

7.22

Spektrum

der Wissenschaft

Quanteninternet

und die Zukunft
sicherer Kommunikation

COVID-19 Was macht Omikron so besonders?

OPEN-SOURCE-INTELLIGENCE Digitale Spurensuche nach Kriegsverbrechen

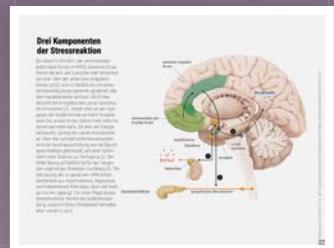
SUPERNOVA Warten auf die nächste Sternexplosion

Spektrum der Wissenschaft KOMPAKT



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

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



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



Hier bestellen:
E-Mail: service@spektrum.de
Spektrum.de/aktion/kompakt



EDITORIAL KRIEGSVERBRECHEN AUFDECKEN

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

► Leider tobte bei Redaktionsschluss immer noch der Krieg in der Ukraine. Und je mehr Dörfer und Städte die Ukrainer von der angreifenden russischen Armee zurückerobern, desto offensichtlicher werden auch deren Verbrechen gegen die Zivilbevölkerung. Die Namen von Irpin oder Butscha werden zukünftig in einer Reihe mit Sant'Anna di Stazzema, My Lai, Srebrenica oder Aleppo stehen, in denen Soldaten Massaker an unbeteiligten Männern, Frauen und Kindern verübt haben.

Dank der allgegenwärtigen Smartphones können Taten und Täter heute leichter dokumentiert und nachverfolgt werden als früher. Das internationale investigative Recherche-Netzwerk Bellingcat sammelt und prüft diese Bilder auf ihre Echtheit – und nutzt dazu modernste Analysemethoden, deren technische Hintergründe unsere Redakteurin Manon Bischoff ab S. 62 beschreibt.

Die akribische Arbeit am Bildmaterial soll wahre von gestellten Aufnahmen trennen und verhindern, dass falsche Zusammenhänge oder Propaganda die Berichterstattung verzerrn oder gar politische Entscheidungen beeinflussen. Mit Hilfe der Technik konnte Bellingcat schon einige Kriegsverbrechen zweifelsfrei belegen. Es bleibt zu hoffen, dass die Verantwortlichen dafür schließlich auch zur Rechenschaft gezogen werden.

Der Ukraine-Krieg hat vorübergehend eine zweite globale Krise aus den Schlagzeilen gedrängt. Dabei ist die Covid-Pandemie nicht ausgestanden. Immer noch stecken sich weltweit zahlreiche Menschen mit dem Virus an; die Omikron-Variante hat der Pandemie einen massiven Schub gegeben und mittlerweile sogar offiziell Nordkorea erreicht. Auf welchen Anpassungen der Erfolg von Omikron genau basiert, zeigt unser Artikel ab S. 38 auf. Und die beeindruckende Wandlungsfähigkeit von Sars-CoV-2 dürfte damit nicht am Ende sein.

Eine spannende Lektüre wünscht



NEU AM KIOSK!

Spektrum SPEZIAL Physik – Mathematik – Technik 2.22 gibt einen Überblick über aktuelle Forschungen in der Astronomie und Kosmologie.

IN DIESER AUSGABE



CAROLE PARODI

NICOLAS GISIN

Der Schweizer Professor forscht an vielfältigen fundamentalen physikalischen Fragen: von Quantengravitation über die Natur der Zeit bis hin zu Quantenkommunikation und -netzwerken, wie ab S. 22 zu lesen ist.



DIRK SCHMELLER

Der Ökologe untersucht Bergseen in tausenden Meter Höhe. Seine Erkenntnis: Selbst dort ist die menschengemachte Verschmutzung massiv angekommen (S. 28).



FORREST ROGERS

Der gelernte Journalist war als Berater von Regierungen und internationalen Unternehmen tätig und verfeinerte dabei sein Recherchetalent. So gelang es ihm, das FBI bei Ermittlungen zu unterstützen, wie er ab S. 71 erklärt.

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

28 FORSCHUNG AKTUELL

Vergiftete Gewässer

Bergseen sind bedenklich stark mit Schadstoffen belastet.

Überraschung beim Temperaturnullpunkt

Materie-Antimaterie-Hybide zeigen seltsame Spektren.

Eruption der anderen Art

Wie der Hunga-Vulkan die Wissenschaft erschütterte.

36 SPRINGERS EINWÜRFE

Brainstorming per Video

Virtuell sind wir weniger kreativ als bei realen Treffen.

37 ZEITREISE

51 FREISTETTERS FORMELWELT

Mathematik als Kunstform

Beweise können verborgene Strukturen offenbaren.

60 SCHLICHTING!

Der rasende Knoten

Eine verdrehte Metallfeder rotiert auf komplexe Weise.

88 REZENSIONEN

95 LESERBRIEFE

95 IMPRESSUM

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

98 VORSCHAU

12 PHYSIK ERSTE SCHRITTE ZUM QUANTENINTERNET

In einem komplizierten Netzwerk wie dem Quanteninternet könnten unerwartete quantenphysikalische Phänomene auftreten.

Von Marc-Olivier Renou, Nicolas Brunner, Nicolas Gisin

22 INTERVIEW »ES STEHT VIEL AUF DEM SPIEL«

Der Physiker Nicolas Gisin erklärt, was es mit dem Quanteninternet auf sich hat, und erläutert die jüngsten Fortschritte.

Von Sean Bailly

38 MOLEKULARBIOLOGIE

ERREGER MIT ÜBERRASCHENDEN EIGENSCHAFTEN

Dank vieler Mutationen verbirgt sich der Coronavirustyp Omikron vor dem Immunsystem und findet neue Wege, menschliche Zellen zu befallen.

Von Megan Scudellari

44 MEDIZIN LÄNGER JUNG DANK ZELLULÄRER MÜLLABFUHR?

Serie: Altern (Teil 2) Biologische Entgiftungsmechanismen könnten es ermöglichen, altersbedingte Krankheiten zu bekämpfen.

Von Elie Dolgin

52 SUPERNOVAE

WARTEN AUF DAS GALAKTISCHE FEUERWERK

Überall auf der Welt laufen Vorbereitungen für den Fall, dass irgendwo in der Milchstraße ein Stern explodiert.

Von Davide Castelvecchi

62 OPEN-SOURCE-INTELLIGENCE AUF DIGITALER SPURENSUCHE

Online-Ermittler haben ausgeklügelte Tricks entwickelt, um digitale Inhalte zu prüfen – und erstaunliche Wahrheiten ans Licht gebracht.

Von Manon Bischoff

71 INTERVIEW

»FAKten SIND DAS ERSTE OPFER EINES KRIEGS«

Der investigative Journalist Forrest Rogers beschreibt, wie er öffentlich zugängliche Aufnahmen prüft und welche Folgen das hat.

Von Manon Bischoff

74 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN EINMALEINS IM KREIS

In einem endlichen Zahlenbereich gelten seltsame Rechenregeln, die zu überraschenden Mustern führen.

Von Christoph Pöppel

80 ARCHÄOLOGIE DIE OPFERGRUBEN VON SANXINGDUI

Im Südwesten Chinas haben Menschen vor rund 3200 Jahren massenhaft Kunstwerke in Erdgruben vergraben – vermutlich als Gaben an ihre Götter. Doch wozu die vielen Objekte einst dienten und welche Zivilisation sie gefertigt hatte, stellt Archäologen noch vor Rätsel..

Von Hubert Filser

TITELBILD:
QUADRIE / GETTY IMAGES / ISTOCK.
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



12

TITELTHEMA
ERSTE SCHRITTE ZUM
QUANTENINTERNET



44

MEDIZIN
ZELLULÄRE
MÜLLABFUHR



52

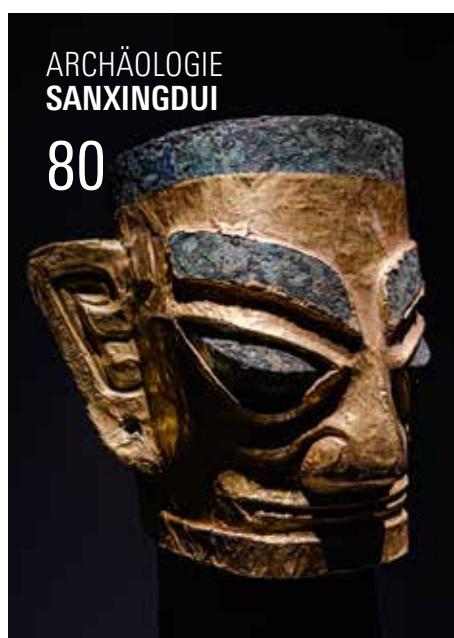
SUPERNOVAE
GALAKTISCHES
FEUERWERK



MATTHIAS CLARKE / GETTY IMAGES / STOCK

OPEN-SOURCE-
INTELLIGENCE
DIGITALE
SPUREN-
SUCHE

62



ARCHÄOLOGIE
SANXINGDUI

80

ZHOU BO / HPC / DPA / PICTURE ALLIANCE



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

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

SPEKTROGRAMM





NEUE MINIFROSCH-SPEZIES ENTDECKT

► Fachleute haben sechs neue Froscharten beschrieben, die zur Gattung *Craugastor* gehören und in Mexiko sowie Guatemala vorkommen. Darunter sind Zwerge, die ausgewachsen kaum die Größe eines Fingernagels erreichen. Lediglich 13 Millimeter in der Länge misst das kleinste Exemplar. Die winzigen Tiere leben auf laubbedecktem Waldboden. Ihre Entwicklung unterscheidet sich von der anderer Frösche: Sie bilden keine Kaulquappen aus, sondern aus den Eiern schlüpfen die bereits fertig entwickelten Landtiere.

Für ihre Arbeit haben Tom Jameson von der University of Cambridge und sein Team unter anderem mehrere hundert Froschpräparate untersucht, die in Museen aufbewahrt werden. Per Genanalyse und Computertomografie gelang es ihnen, die neuen Arten zu identifizieren. Eine der Spezies bekam den Namen *Craugastor rubinus* und ist auf dem Foto zu sehen. Das abgebildete Exemplar sitzt auf einer mexikanischen Zehn-Peso-Münze, die 28 Millimeter Durchmesser hat.

Herpetological Monographs 10.1655/0733-1347-36.11, 2022

ASTRONOMIE DAS MASSEMONSTER INMITTEN DER MILCHSTRASSE

► Astronominnen und Astronomen ist es erstmals gelungen, das Schwarze Loch im Zentrum unserer Heimatgalaxie abzubilden. Dazu nutzten sie im Rahmen der internationalen Forschungskooperation Event Horizon Telescope (EHT) ein weltweites Netzwerk von Radioteleskopen.

Schon lange ist bekannt, dass die Sterne im Zentrum der Milchstraße um ein unsichtbares, kompaktes und massreiches Objekt namens Sagittarius A* kreisen. Viel sprach dafür, dass es sich hierbei um ein Schwarzes Loch handelt. Die jetzt veröffentlichten Bilder machen es sichtbar. Zwar ist das Massemonster selbst nicht zu sehen, da es kein Licht aussendet. Doch leuchtendes Gas, das sich um das Objekt herumbewegt, enthüllt die verräterische Struktur einer dunklen Zentralregion, die von einer hellen ringähnlichen Scheibe umgeben ist. Den Untersuchungen zufolge ist das

DUNKLER SCHLUND Das Schwarze Loch
Sagittarius A*, umgeben von leuchtender Materie.

Schwarze Loch etwa vier Millionen Mal so massereich wie unsere Sonne.

Sagittarius A* befindet sich 27 000 Lichtjahre von der Erde entfernt und erscheint uns so groß wie ein Donut auf dem Mond. Um es abilden zu können, schalteten die EHT-Wissenschaftler acht Radio-Observatorien rund um den Planeten zu einem virtuellen Teleskop von der Größe der Erde zusammen. Dieses sammelte mehrere Nächte lang Daten, aus denen sich die Bilder erstellen ließen.

Die EHT-Initiative hatte bereits 2019 das erste Bild eines Schwarzen Lochs

überhaupt veröffentlicht – des Objekts M87* nämlich, das im Zentrum der Galaxie Messier 87 sitzt. Sagittarius A* abzubilden, war allerdings schwieriger, da es rund 1000-mal kleiner ist als M87*. Deshalb wird es von benachbartem leuchtenden Gas in wenigen Minuten umrundet, während das bei M87* Tage bis Wochen dauert. Das Helligkeitsmuster rund um Sagittarius A* unterliegt somit schnellen Schwankungen, was die Forscher beim Abbilden berücksichtigen mussten.

*Pressemitteilung der EHT-Initiative,
12. Mai 2022*

CHEMIE KOHLENSTOFFNANORÖHREN STABILISIEREN SUPER-SPRENGSTOFFE

► Kettenmoleküle, die nur aus Stickstoff bestehen, gehören zu den energiereichsten Verbindungen überhaupt. Genau darum ist derartiger polymerer Stickstoff aber zu instabil, um einen praktischen Nutzen zu haben. Kohlenstoffnanoröhren könnten das Problem womöglich lösen, berichtet eine Arbeitsgruppe um Chi Ding von der Nanjing University. Ihr zufolge bilden sich in Kohlenstoffnanoröhren bisher unbekannte Strukturen aus reinem Stickstoff, die einerseits sehr energiereich, andererseits bei Raumtemperatur stabil sind. Das Team kam zu diesem Schluss mit Hilfe zweier Simulationsverfahren. Noch ist allerdings offen, ob sich solche Strukturen in der Praxis herstellen und nutzen lassen.

Kettenmoleküle aus Stickstoff eignen sich wegen ihrer inneren Bindungen sehr gut als Sprengstoff. Zweiatomiger Stickstoff (N_2), aus dem vier Fünftel der Erdatmosphäre besteht, ist wegen der Dreifachbindung zwischen den beiden Atomen äußerst stabil. Polymerer Stickstoff hingegen, in dem die Atome über Einfach- und Doppelbindungen verknüpft sind, neigt dazu, sich schlagartig zu N_2 umzuwandeln und dabei sehr viel Energie abzugeben. Das und die Tatsache, dass dabei lediglich ein ungiftiges Gas entsteht, machen solche Moleküle als technische Sprengstoffe begehrt.

Chi Ding und Kollegen haben die Energiedichte stickstoffreicher Moleküle – beispielsweise Isocyano-

gentetraazid (C_2N_{14}) – in Kohlenstoffnanoröhren am Computer simuliert. Mit einem Verfahren des maschinellen Lernens fanden sie dabei Strukturen, die unter Alltagsbedingungen stabil sein könnten. Das Ergebnis überprüfte das Team anschließend mit einem weiteren Computeralgorithmus zur Molekulardynamik.

Damit eröffnen sich bisher unbekannte Möglichkeiten, Stickstoffatomekettenförmig in Kohlenstoffnanoröhren anzurichten. Die Daten deuten darauf hin, dass die so eingekapselten Stickstoffstrukturen unter Alltagsbedingungen stabil sind, zugleich aber die doppelte Energiedichte des Sprengstoffs TNT besitzen.

Chinese Physics Letters 10.1088/0256-307X/39/3/036101, 2022

MIKROBIOLOGIE

MULTIRESISTENTE SCHIMMELPILZE BREITEN SICH AUS

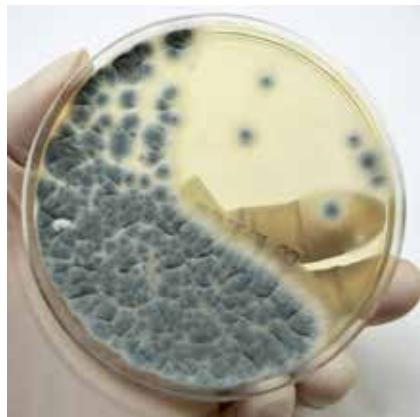
► Arzneistoffresistente Varianten des Schimmelpilzes *Aspergillus fumigatus*, die beim Menschen gefährliche Infektionen verursachen, verbreiten sich in der Umwelt. Zu diesem Schluss kommt ein Team um Johanna Rhodes vom Imperial College London. Die Forscherinnen und Forscher haben 218 Proben des Pilzes untersucht, die in Großbritannien und Irland sowohl Infizierte als auch ihrer Umgebung entnommen worden waren. 106 Proben zeigten eine Resistenz gegen mindestens ein gängiges Antipilzmittel. 26 Proben waren unempfindlich gegen zwei oder mehr Wirkstoffe; 23 davon stammten aus der Umwelt.

Aspergillus fumigatus kommt sehr häufig vor: Nahezu jeder Mensch atmet die Sporen täglich ein. Der Pilz verursacht eine gefährliche Infektionskrankheit, die Fachleute als invasive Aspergillose bezeichnen. An ihr sterben viele Patienten mit geschwächtem

Immunsystem, etwa Krebskranken oder Organempfänger. Aber auch andere Personen können sich mit dem Pilz infizieren und schwer erkranken, wenn sie beispielsweise an Atemwegskomplikationen leiden.

Invasive Aspergillose tötet bei medikamentöser Behandlung rund ein Viertel bis ein Drittel der Infizierten. Ohne Therapie sterben fast alle. Daher bereitet es Medizinern große Sorge, dass der Anteil der resistenten Erreger seit Jahren steigt. Bislang schien unklar, ob die Arzneimittelunempfindlichkeit durch die Behandlung entsteht oder ob die Patienten sich von vornherein mit resistenten Sporen infizieren.

Laut der neuen Studie kommt beides vor: Der Pilz kann infolge einer Arzneistofftherapie resistent werden, seine Unempfindlichkeit aber auch abseits vom Medizinbetrieb erlangen. Das Team fand mehrere Proben von erkrankten Menschen, die aus der



UNDEI / GETTY IMAGES / ISTOCK

PELZIG Eine Petrischale mit dem Pilz *Aspergillus fumigatus*.

Umwelt entnommenen Pilzen genetisch derart ähnlich waren, dass sich die Betroffenen offensichtlich mit bereits resistenten Keimen angesteckt hatten. Diese gehen vermutlich auf den häufigen Einsatz von Fungiziden in der Landwirtschaft zurück.

Nature Microbiology 10.1038/s41564-022-01091-2, 2022

ARCHÄOLOGIE

DIE ÄLTESTE WAGEN-SPUR DER WELT

► Bei Ausgrabungen nahe Kiel ist die Spur eines steinzeitlichen Gefährts mit Rädern zu Tage gekommen. Die rund 5400 Jahre alten Streifen im

Boden legen nahe, dass von Tieren gezogene Wagen schon sehr früh verbreitet waren. Nach Ansicht der Archäologin Doris Mischka von der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel stellen die Verfärbungen den ältesten bekannten Beleg für die Nutzung von Rädern und Wagen dar.

Die beiden parallelen Linien wurden bei archäologischen Feldarbeiten auf einem der größten europäischen Megalith-Friedhöfe entdeckt. Dort reihen sich nahe dem Ort Flintbek dutzende Grabhügel und Steingräber aus der Jungsteinzeit und Bronzezeit aneinander. Die frühesten Ruhestätten sind laut ^{14}C -Datierung rund 5800 Jahre alt. Die mutmaßliche Wagenspur entstand der ^{14}C -Methode zufolge etwa 400 Jahre später, ist zirka 20 Meter lang und spannt sich zwischen zwei Grabmonumenten.

EINGEDRÜCKT Eine 5400 Jahre alte Wagenspur im Boden.

DIETER STOLTEMBERG



Mischkas Team stellte fest, dass die fünf bis sechs Zentimeter breiten Streifen mit der Dicke jungsteinzeitlicher Holzräder übereinstimmen, die unter anderem in norddeutschen Mooren gefunden wurden. Weiterhin entspricht der Abstand beider Linien genau der Breite jungsteinzeitlicher Wagenachsen. Somit handelt es sich sehr wahrscheinlich um die Spur eines Karrens, den vermutlich Rinder zogen. Der Schluss liegt nahe, dass die Errichter der Grabmonumente ihr Baumaterial mit Wagen transportierten – eine Methode, die damals zu den Hochtechnologien zählte. Es erscheint sogar möglich, dass Lastkarren in Europa erfunden wurden statt im Nahen Osten wie bislang angenommen. Die Radspur ist mehrere Jahrhunderte älter als entsprechende Indizien, die man aus anderen Weltregionen kennt.

Pressemitteilung der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 11. April 2022

SPEKTROGRAMM

PHYSIK

IST DAS W-BOSON ZU SCHWER FÜR DAS STANDARDMODELL?

► Das W-Boson könnte schwerer sein, als vom Standardmodell der Teilchenphysik vorausgesagt. Zu diesem Ergebnis kommt ein Team um Ashutosh Kotwal von der Duke University in Durham (USA). Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben die Masse des Teilchens erneut gemessen und einen Wert ermittelt, der nicht mit dem theoretisch prognostizierten übereinstimmt.

Als so genanntes Eichboson tritt das W-Boson nur bei hochenergetischen Teilchenwechselwirkungen in Erscheinung. Es vermittelt die schwache Wechselwirkung, eine der vier

Elementarkräfte, und ist rund 80-mal schwerer als ein Proton. Das Standardmodell der Teilchenphysik sagt für seine Masse einen Wert von $80357 \text{ MeV}/c^2$ vorher. Früher ermittelte Messwerte stimmen im Rahmen der Unsicherheit damit überein.

Kotwal und sein Team werteten Daten des Tevatron-Teilchenbeschleunigers aus, der bis zum Jahr 2011 in Illinois (USA) aktiv gewesen war. Er hatte dazu gedient, Protonen und Antiprotonen kollidieren zu lassen, wobei zahlreiche weitere Teilchen entstanden. In den jetzt analysierten Messdaten steckten die Werte von rund vier

Millionen W-Bosonen. Damit ließ sich die Masse des Elementarteilchens sehr präzise auf $80433,5 \pm 9,4 \text{ MeV}/c^2$ bestimmen.

Der Unterschied zur theoretischen Vorhersage ist statistisch signifikant. Angesichts dessen, dass Forscher weltweit nach Abweichungen vom Standardmodell suchen, weil sie Hinweise auf eine Physik jenseits davon erhoffen, sind das eigentlich gute Nachrichten. Doch erst einmal müssen weitere unabhängige Messungen die Diskrepanz bestätigen, bevor das Standardmodell ernsthaft wankt.

Science 10.1126/science.abk1781, 2022

ÖKOLOGIE

NOCH EIN SCHELFEIS WENIGER

► Das Conger-Schelfeis der Ostantarktis, eine schwimmende Struktur von der Größe des halben Saarlands, ist am 15. März 2022 endgültig zerfallen. Schon in den Vorjahren war es immer weiter geschrumpft.

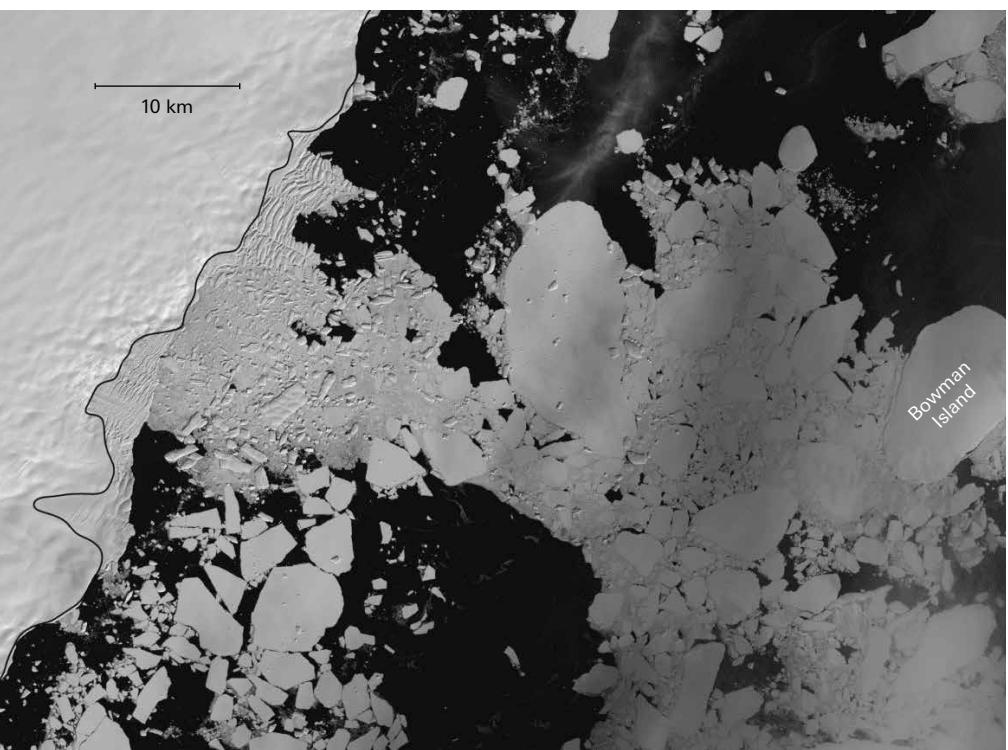
Die antarktischen Schelfeisgebiete grenzen an das Inlandeis und verlän-

gern es bis ins Südpolarmeer. Brechen Strukturen wie der Conger-Eisschelf zusammen, halten sie das benachbarte Inlandeis nicht mehr zurück. Dieses fließt daraufhin schneller ins Meer und schmilzt dort, was den Wasserspiegel steigen lässt. Schelfeis gilt deshalb als »Sicherheitsband« der Antarktis.

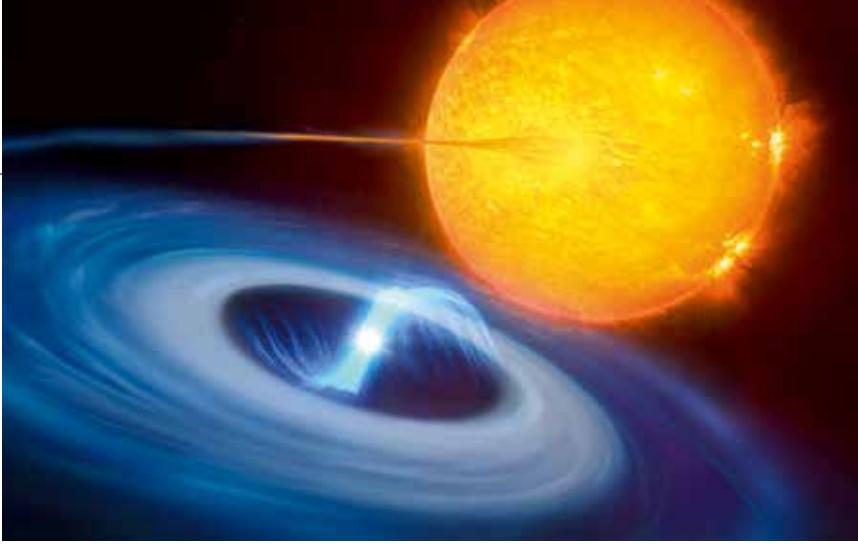
In den zurückliegenden Jahrzehnten ließ sich immer häufiger beobachten, dass große antarktische Schelfeisplatten völlig zerfallen. Beispiele hierfür sind das Prinz-Gustav-Schelfeis (von 1989 bis 1995), Larsen A (1995), Larsen B (2002), Wilkins (2008 bis 2009) und nun Conger. Die Serie von Zusammenbrüchen deutet darauf hin, dass sich die Umweltbedingungen in der Antarktis grundlegend wandeln – allen voran die Temperaturen des Ozeans und der Atmosphäre.

Die globale Erwärmung mache großräumige Schelfeisverluste immer wahrscheinlicher, mahnen Geowissenschaftler auf der wissenschaftsnahen Website »The Conversation«. Damit werde der Verlust des Inlandeises zunehmen und folglich der Meeresspiegel global steigen. Das Wasser des westantarktischen Eisschildes reiche aus, um den Meeresspiegel um mehrere Meter zu heben; wenn überdies auch die Ostantarktis beginne, große Eismengen zu verlieren, könnten daraus dutzende Meter werden.

ZERBROCHEN Die Reste des Conger-Eisschelfs.



The Conversation theconversation.com/congerice-shelf-has-collapsed-what-you-need-to-know-according-to-experts-180077, 2022



MINI-EXPLOSION Künstlerische Darstellung einer Mikronova.

Ausgangspunkt ist wieder ein Weißer Zwerg mit Begleiter. Verfügt er über ein starkes Magnetfeld, kann das Material, das er an sich zieht, in die Polregionen geschleudert werden. Die thermonukleare Detonation beschränkt sich dann auf diese.

Auf die Spur der Mikronovae gekommen war das Team zunächst anhand von Daten des NASA-Teleskops TESS sowie des Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte. Darin waren optische Lichtblitze zu erkennen, die mehrere Stunden anhielten. Scaringi und seine Gruppe machten drei Weiße Zwerge als Quellen dieser Erscheinungen ausfindig. Die Auswertung ergab, dass sich dort Mikronovae ereignet hatten. Da sich zudem in der Fachliteratur viele weitere Hinweise auf kurze Ausbrüche kompakter Sternüberreste finden, könnte die neu entdeckte Art der Sternexplosion sogar recht häufig stattfinden.

Nature 10.1038/s41586-022-04495-6, 2022

ASTROPHYSIK WEISSE ZWERGE KÖNNEN AUCH NUR EIN BISSCHEN EXPLODIEREN

► Bei einer speziellen Form von Sternexplosion detonieren Weiße Zwerge nur zum Teil. Für irdische Verhältnisse sind diese Ereignisse immer noch gewaltig, im kosmischen Maßstab handelt es sich aber eher um kleine Verpuffungen, weshalb das neu entdeckte Phänomen als »Mikronova« bezeichnet wird.

Als ausgebrannte Sternüberreste zeigen Weiße Zwerge verschiedene Arten explosionsartiger Veränderungen (»Novae«). Stets braucht es dazu eine Begleitsonne, deren Material der

Sternüberrest an sich zieht. Bei einer »normalen« Nova fällt hauptsächlich Wasserstoff auf den Weißen Zwerg, bis auf seiner gesamten Oberfläche schlagartig Kernfusionsvorgänge zünden, bei denen der Wasserstoff zu Helium verschmilzt. Es kommt zu einer thermonuklearen Detonation, die den Sternüberrest über Wochen hinweg viel heller erstrahlen lässt.

Ein Team um Simone Scaringi von der Durham University (USA) entdeckte nun, dass sich Novae auch in deutlich kleinerem Umfang abspielen.

MEDIZIN ÜBERGEWICHT ERHÖHT DAS RISIKO FÜR GEBÄRMUTTERKREBS STARK

► Gebärmutterkrebs ist die häufigste gynäkologische Krebserkrankung in Ländern mit hohem Lebensstandard. Meist geht er von der Gebärmutterschleimhaut aus, Fachleute sprechen dann von einem Endometriumkarzinom. Schon länger ist bekannt, dass Übergewicht das Risiko für diese Krebsart erhöht – in welchem Ausmaß, war dagegen unklar. Die Molekularbiologin Emma Hazelwood und ihre Kollegen von der University of Bristol haben das jetzt in einer großen Studie genauer untersucht.

Laut den Daten erhöht Übergewicht die Wahrscheinlichkeit, an Gebärmutterkrebs zu erkranken deutlich stärker als bislang angenommen. Für je fünf zusätzliche Einheiten des Body-Mass-Index (BMI) steigt das Risiko um

88 Prozent. Fünf zusätzliche BMI-Einheiten entsprechen dem Unterschied zwischen normal- und übergewichtig beziehungsweise zwischen übergewichtig und fettleibig. Bei einer erwachsenen Frau, die 1,65 Meter groß ist, wären das 13,6 Kilogramm mehr.

Um herauszufinden, welche molekularen Mechanismen dahinterstehen, nahmen die Forscherinnen und Forscher genetische Untersuchungen an rund 120000 Frauen aus verschiedenen Ländern vor. Etwa 13000 davon waren an Gebärmutterkrebs erkrankt. Das Team testete auf 14 genetische Risikomerkmale, die mit Stoffwechsel, Hormonhaushalt und Entzündungen zusammenhängen. Mit Insulin, Testosteron und dem sexuellhormonbindenden Globulin (SHBG)

identifizierte es drei körpereigene Substanzen, die einerseits das Krebsrisiko erhöhen und andererseits mit Übergewicht in Verbindung stehen. Wie schon länger bekannt, gibt Fettgewebe hormonell wirksame Stoffe ins Blut ab und beteiligt sich am Stoffwechsel von Steroiden und Sexualhormonen.

Genauere Einblicke darin, wie Übergewicht das Krebsrisiko beeinflusst, könnten Hinweise darauf liefern, wie sich die Behandlung von Risikopatientinnen verbessern lässt. Der Arzneistoff Metformin beispielsweise, der gegen Diabetes eingesetzt wird, kann die Testosteronproduktion blockieren und damit das Krebsrisiko reduzieren.

BMC Medicine 10.1186/s12916-022-02322-3, 2022

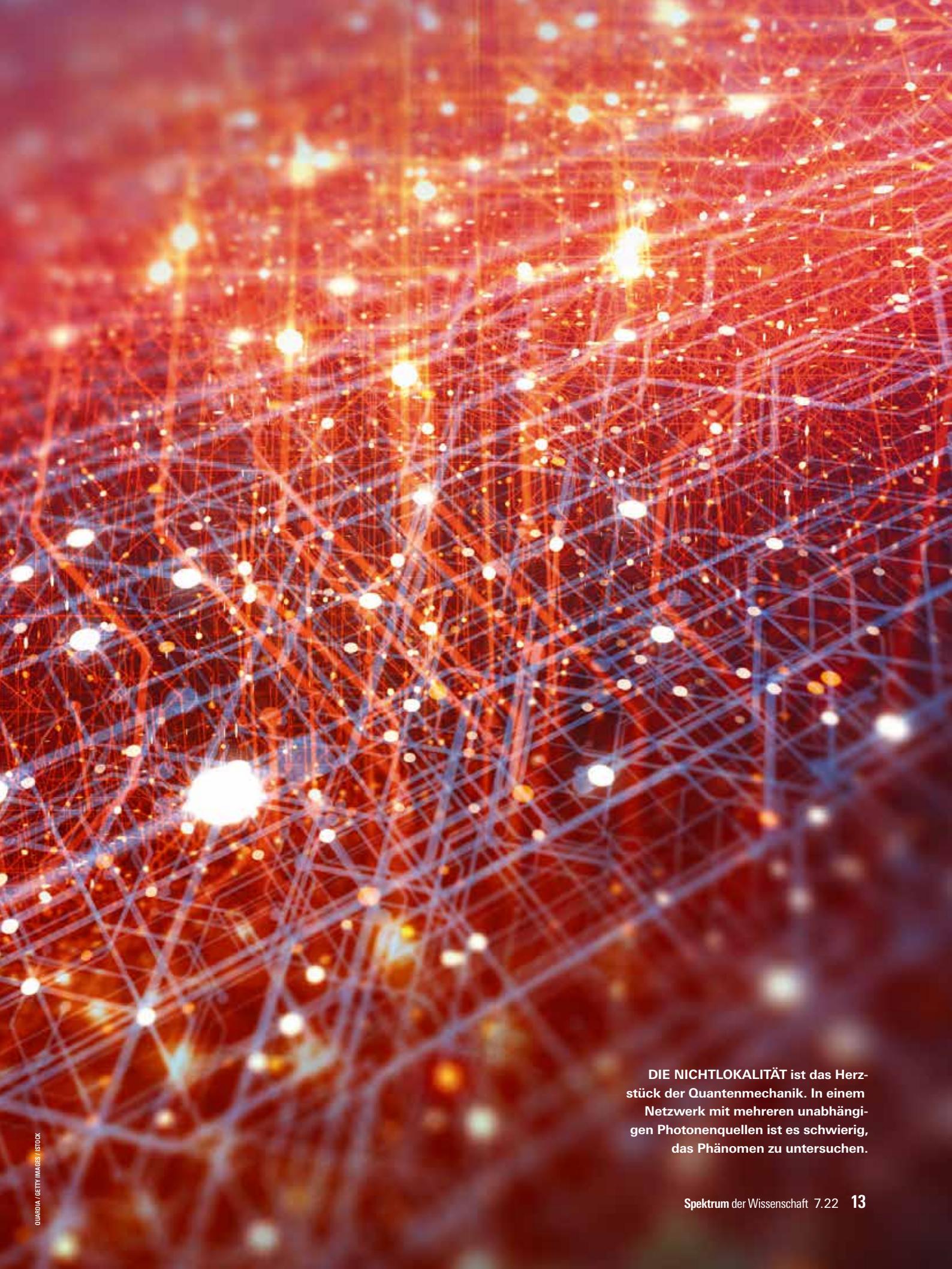
PHYSIK ERSTE SCHRITTE ZUM QUANTENINTERNET

Die Gesetze der Quantenmechanik lassen seltsamste Vorgänge zu – etwa, dass sich zwei weit entfernte Objekte unmittelbar beeinflussen. Dieses Prinzip wird zwar seit Jahrzehnten erforscht, doch ein kompliziertes Netzwerk wie das Quanteninternet könnte unerwartete Phänomene hervorbringen.



Marc-Olivier Renou (links) ist theoretischer Physiker am Institut für Photonische Wissenschaften (ICFO) in Barcelona. **Nicolas Brunner** (Mitte) ist Experimentalphysiker an der Universität Genf und **Nicolas Gisin** Quantenphysiker am Schaffhausen Institute of Technology in Genf sowie emeritierter Professor an der Universität Genf.

► spektrum.de/artikel/2021563



DIE NICHTLOKALITÄT ist das Herzstück der Quantenmechanik. In einem Netzwerk mit mehreren unabhängigen Photonenquellen ist es schwierig, das Phänomen zu untersuchen.

► Im Internet spielen sich heute wesentliche Teile des Lebens ab. Man findet dort unter anderem sensible Informationen wie Bank- oder Gesundheitsdaten, E-Mails, Nachrichten in sozialen Netzwerken, Fotos und vieles mehr. Um eine sichere Übertragung zu gewährleisten, ohne dass die Inhalte gestohlen, gelesen oder verändert werden, hat man verschiedene kryptografische Verfahren entwickelt. Sie nutzen mathematische Probleme, die herkömmliche Computer ohne einen Schlüssel nicht in angemessener Zeit lösen können. Beispielsweise beruhen einige Algorithmen auf der Tatsache, dass die Primfaktorzerlegung großer Zahlen extrem aufwändig ist.

Die Entwicklung von leistungsfähigen Quantencomputern könnte diesen Ansatz jedoch zunichthemachen. So genannte Quantenalgorithmen würden die ganze Kraft der Quantenphysik nutzen, um Probleme effizient zu lösen, die für ihre klassischen Konkurrenten unerreichbar sind. Das ist beispielsweise der Fall bei dem 1994 vom US-amerikanischen Mathematiker Peter Shor vorgeschlagenen Algorithmus, der theoretisch in der Lage ist, sehr große Zahlen schnell zu faktorisieren. Mit Quantencomputern wird die Übermittlung von Bankdaten beim Onlineshopping vor Angriffen also nicht mehr sicher sein.

Aber jene Quantenphänomene, die künftigen Computergenerationen ihre erstaunlichen Fähigkeiten verleihen, könnten glücklicherweise auch den Schlüssel zum Aufbau eines hochsicheren Quanteninternets liefern. Dessen einzigartige Eigenschaften machen einen Angriff unmöglich, wodurch einige klassische Verschlüsselungsverfahren überflüssig werden.

Ein solches Quantennetzwerk beruht auf zahlreichen Apparaturen und Ideen, die sowohl eine technologische als auch eine theoretische Herausforderung darstellen. Der Aspekt, der uns als Physiker dabei am meisten interessiert, ist die so genannte Nichtlokalität. Sie manifestiert sich in unterschiedlichsten Quantensystemen: von den einfachsten, die nur aus zwei Photonen (Elementarteilchen des Lichts) bestehen, bis hin zu komplexen Netzwerken wie

dem Quanteninternet. Die Nichtlokalität ist der Hauptgrund dafür, dass die Quantenphysik als kontraintuitiv gilt.

Denn wir erleben tagtäglich das Gegenteil, nämlich Lokalität. Hier finden alle Bewegungen gemäß den Gesetzen der speziellen Relativitätstheorie kontinuierlich von einem Ort zu einem anderen mit einer endlichen Geschwindigkeit statt, die kleiner oder gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Anders gesagt: Nichts kann gleichzeitig an zwei Orten sein. Auf mikroskopischer Ebene ist das jedoch nicht der Fall. Zumindest nicht, wenn man annimmt, man könne frei wählen, was man wie misst (siehe »Unabhängige Messung und Superdeterminismus«).

Beim Übergang von der makroskopischen zur Quantenwelt muss man also einige Überzeugungen aufgeben, die uns ein Leben lang begleiten. Man kann sich dazu einen Detektiv vorstellen, der wie wir selbst mit einer klassischen Intuition ausgestattet ist und in einem Quantenuniversum ermittelt. Es würde ihm schwerfallen, manche Rätsel zu entschlüsseln, denn er wäre zwangsläufig mit für ihn widersprüchlich erscheinenden Situationen konfrontiert: Etwa, dass es nicht sinnvoll ist, über den Ort und die Geschwindigkeit eines Verdächtigen zum Zeitpunkt des Verbrechens zu argumentieren. Der Täter könnte sich an zwei Orten gleichzeitig aufhalten, und das Opfer könnte sowohl tot als auch lebendig sein!

Physiker entwickeln Quantenintuition

Seit der Geburt der Quantenmechanik vor fast einem Jahrhundert haben Physikerinnen und Physiker die Theorie immer wieder auf den Prüfstand gestellt. Ihnen ging es nämlich nicht anders als dem Detektiv, sie konnten die erstaunlichen Resultate kaum glauben. Aber die Ergebnisse untermauerten stets die unintuitiven Gesetzmäßigkeiten, weshalb die Fachleute allmählich eine gewisse Quantenintuition entwickelten. Das Prinzip der Nichtlokalität bildet einen wichtigen Bestandteil und hat eine lange Geschichte, die von Debatten, theoretischen Durchbrüchen und bahnbrechenden Experimenten geprägt ist. Bisher verwendeten Fachleute stets einzelne Quellen, die zwei oder drei Photonen für ihre Versuche erzeugen. Doch was passiert, wenn verschiedene Quellen am Werk sind, wie es bei einem Quanteninternet der Fall wäre? Dies dürfte die Art und Weise, wie sich Nichtlokalität äußert und wie sie zu verstehen ist, völlig verändern und unsere Intuition erneut erschüttern.

Als das Interesse am Quanteninternet im letzten Jahrzehnt wuchs, haben sich theoretische Physikerinnen und Physiker daher vermehrt mit Systemen befasst, die aus mehreren Photonenquellen bestehen. Sie beginnen aber erst jetzt zu erahnen, wie man das Phänomen der Nichtlokalität überdenken könnte. Offenbar lässt es sich nicht mehr eindeutig formulieren, sondern scheint vom Kontext abzuhängen, in dem es auftritt.

Um die Herausforderungen nachzuvollziehen, muss man verstehen, wie Forscherinnen und Forscher sich in den letzten 100 Jahren schrittweise dem Prinzip der Nichtlokalität genähert haben. Bereits ganz am Anfang, als sie erstmals die Grundlagen der Quantenmechanik erforschten, stießen sie auf Schwierigkeiten. Wie konnten die zwei

AUF EINEN BLICK NETZWERK AUS NICHTLOKALITÄT

- 1 Das Prinzip der Lokalität besagt, dass sich Information höchstens mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann. In der Quantenphysik können sich Teilchen jedoch unmittelbar beeinflussen.
- 2 Das untersuchen Physiker in vielen Experimenten, bei denen einzelne Quellen verschränkte Photonen erzeugen. Aus ihnen ergibt sich, dass die Quantenmechanik nicht mit Lokalität vereinbar ist.
- 3 Ein zukünftiges Quanteninternet wird aus zahlreichen unabhängigen Photonenquellen bestehen. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen beginnt die Fachwelt gerade erst zu erahnen.

Unabhängige Messung und Superdeterminismus

In quantenphysikalischen Experimenten wie dem Bell- oder GHZ-Versuch findet man Korrelationen zwischen Messungen, die zeitgleich an verschiedenen Orten gewählt und durchgeführt wurden. Das lässt sich nicht erklären, wenn man entweder Lokalität oder freie Wahl der Messgrößen annimmt. Was genau man misst, erfolgt in den beschriebenen Versuchen zufällig, etwa durch den Wurf einer Münze. Vielleicht ist dieser aber gar nicht so zufällig, wie man meinen würde: Das Ergebnis hängt davon ab, wie sich die Münze bewegt, von den Luftströmungen und so weiter. Hält man am Prinzip der Lokalität fest, ließen sich die Korrelationen also erklären, indem man die freie Wahl der Messgrößen in Frage stellt. Das ist jedoch nicht so einfach. Selbst wenn die

Münzwürfe deterministischen Regeln folgen, müssten sich etwa die Bewegungen der Münzen auf intelligente Weise verschwören, um das von der Quantenphysik vorhergesagte Ergebnis im GHZ-Experiment zu reproduzieren. Eine gemeinsame Ursache müsste demnach sowohl die gemessenen Objekte als auch die Würfe so beeinflussen, dass die Messergebnisse genau mit den Vorhersagen der Quantenmechanik übereinstimmen. Diese Überlegung ist als superdeterministische Erklärung bekannt.

Um solche Argumentationen zu umgehen, verwenden heutige Versuche Zufallszahlengeneratoren, die ihre Zufälligkeit aus so unterschiedlichen Quellen beziehen wie Fluktuationen im Licht von Lasern, Strahlung von Quasaren

vor Milliarden von Jahren, Bits aus der Digitalisierung alter Hollywoodfilme, Dezimalstellen von Pi und so weiter. Solche Experimente lassen sich nur im superdeterministischen Rahmen erklären, wenn es eine Verbindung zwischen ihnen und beispielsweise dem Licht von Quasaren gibt. Schnell führt das zu dem Schluss, alles sei vorherbestimmt. Derartige Behauptungen sind nicht widerlegbar und fallen damit aus dem wissenschaftlichen Rahmen. Man kann sich fragen, welchen Sinn physikalische Gesetze haben sollen, wenn alles schon festgelegt ist. Daher lehnen die meisten Physiker diesen Weg ab – und akzeptieren damit implizit das Prinzip der freien Wahl der Messgröße und, genauer, die Möglichkeit von Experimenten ohne Superdeterminismus.

ANSTATT EINE MÜNZE zu werfen, nutzte die Gruppe um Anton Zeilinger von der Universität Wien für ihr Bell-Experiment im Jahr 2017 das Licht zweier Sterne, die mehr als 500 Lichtjahre voneinander entfernt sind. Die Forscher führten eine von zwei verschiedenen Messungen aus, je nachdem, ob die Frequenz der Photonen ober- oder unterhalb eines bestimmten Schwellenwerts lag. Glaubt man dem Superdeterminismus, müsste eine mysteriöse Ursache vor 500 Jahren dafür gesorgt haben, dass die Strahlung so eingestellt ist, damit die Messungen zu den Vorhersagen der Quantenmechanik passen. Indem man Quasare nutzt, könnte man diese Logik um mehrere Milliarden Jahre verschieben ...



Quantenkatzen im GHZ-Experiment

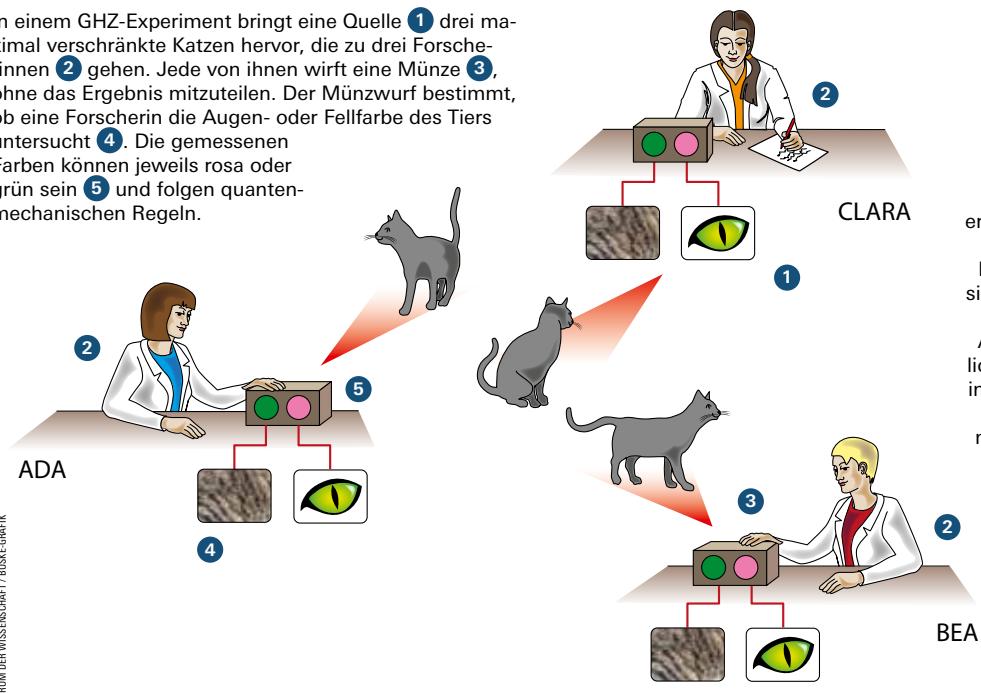
Im GHZ-Experiment sendet eine Quelle gleichzeitig drei verschränkte Photonen an die Forscherinnen Ada, Bea und Clara. Sie bestimmen zeitgleich die Polarisation entlang zweier möglicher Richtungen. Für eine bessere Veranschaulichung kann man die Lichtquanten durch Katzen und die Polarisation durch Farbe (grün oder rosa) ersetzen, die sich entweder auf das Fell (F) oder die Augen (A) des Tiers bezieht. Jede Experimentatorin entscheidet durch den Wurf einer Münze, ob sie die Augen oder das Fell ihrer Katze bestimmen möchte, ohne den anderen ihre Wahl mitzuteilen. Gemäß der Quantenmechanik finden die Forscherinnen, wenn sie alle F messen, eine ungerade Anzahl (1 oder 3) grün vor und damit eine gerade Anzahl (0 oder 2) rosa. Bestimmt eine Wissenschaftlerin F und die beiden anderen hingegen A, gibt es eine gerade Anzahl (0 oder 2) grün und damit eine ungerade Anzahl (1 oder 3) rosa. Die experimentellen Beobach-

tungen bestätigen diese Vorhersagen. Kann ein Detektiv, der sich einzlig und allein auf seine klassische Intuition stützt, insbesondere auf die Annahme der Lokalität, die ungewöhnlichen Messergebnisse erklären? Er geht davon aus, die Quelle im Zentrum des Experiments erzeuge grüne oder rosa Katzen mit grünen oder rosa Augen. Bei jedem Durchlauf gelangen drei Tiere zu den Messgeräten der drei Wissenschaftlerinnen. Demnach gibt es seiner Meinung nach 64 Konfigurationen von drei Katzen. Bei einer erhält Ada eine rosa Katze mit grünen Augen und Bea und Clara je eine grüne Katze mit rosa Augen. Abhängig vom Ergebnis des Münzwurfs sind mehrere Messungen möglich. Wenn Ada und Bea die Augen und Clara das Fell bestimmen, finden sie zweimal grün, was mit den Beobachtungen des Detektivs und den theoretischen Vorhersagen übereinstimmt. Gleches tritt ein, sobald zwei Forscherinnen die Augen und die dritte Forscherin das

Fell misst. Messen jedoch alle drei das Fell, finden sie zweimal grün vor, was der Quantenmechanik widerspricht – und der Detektiv nie beobachtet!

Geht man auf diese Weise alle 64 Katzenkonfigurationen einzeln durch, findet man, dass keine dieser Möglichkeiten mit den von der Quantenphysik vorhergesagten Ergebnissen vereinbar ist. Die Ausgänge des Versuchs lassen sich also durch keine einzige Farbkombination erklären. Demnach haben die Korrelationen keinen klassischen Ursprung und sind damit nichtlokal – zumindest, wenn man davon ausgeht, jede Forscherin könnte unabhängig und rein zufällig bestimmen, was sie misst. Diese Hypothese räumt eine Ursache aus, die sowohl die Farben der Katzen als auch die Ergebnisse der Münzwürfe bedingt. In diesem Fall wäre es nämlich möglich, dass die drei Forscherinnen nie die problematischen Messungen (alle messen die Farbe des Fells) machen.

In einem GHZ-Experiment bringt eine Quelle 1 drei maximal verschränkte Katzen hervor, die zu drei Forscherinnen 2 gehen. Jede von ihnen wirft eine Münze 3, ohne das Ergebnis mitzuteilen. Der Münzwurf bestimmt, ob eine Forscherin die Augen- oder Fellfarbe des Tiers untersucht 4. Die gemessenen Farben können jeweils rosa oder grün sein 5 und folgen quantenmechanischen Regeln.



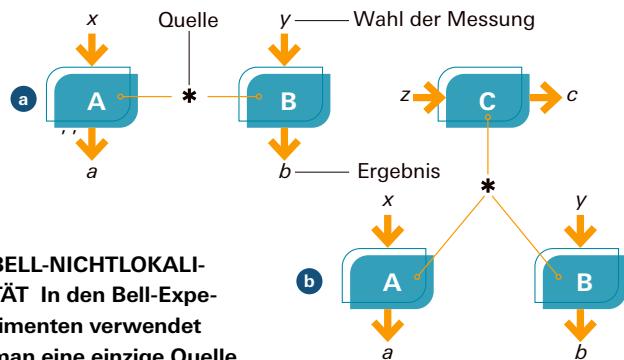
Prinzipien »Lokalität« und »freie Wahl der Messung«, die für die Naturwissenschaft des frühen 20. Jahrhunderts so selbstverständlich schienen, mit der Quantenphysik unvereinbar sein?

In den 1930er Jahren lösten Albert Einstein und seine Kollegen Boris Podolsky und Nathan Rosen die Debatte in einem bis heute berühmten Fachartikel aus. Darin wunderten sie sich über eine »mysteriöse Fernwirkung«, die im Formalismus der Quantenmechanik enthalten war. Wie die drei Forscher nachwiesen, kann ein Ereignis an einem Ort die mathematische Beschreibung eines anderen, weit entfernten physikalischen Systems, augenblicklich beeinflussen, was dem Lokalitätsprinzip zu widersprechen scheint. Für die drei Physiker war das ein Zeichen dafür, dass die Quantentheorie unvollständig ist und es eine alternative Theorie geben musste, die zu denselben Vorhersagen führt, aber ein solches Paradoxon vermeidet.

Ihr dänischer Kollege Niels Bohr, einer der Hauptbegründer der Quantenmechanik, plädierte hingegen dafür, diese Merkwürdigkeit zu akzeptieren, da sie in der Praxis nicht zu Widersprüchen führte. Zum Beispiel lässt sich damit keine Information überlichtschnell vermitteln. Jahrzehntelang fand man weder theoretische Argumente noch konnte man Experimente konzipieren, um die Kontroverse aufzulösen. Die meisten Wissenschaftler schoben das Problem beiseite, da es ihre tägliche Arbeit nicht beeinflusste.

Das änderte sich 1964, als der nordirische Physiker John Bell die Situation entscheidend voranbrachte. Eigentlich suchte er nach einer Theorie, welche die Ergebnisse der Quantenphysik mit dem Prinzip der Lokalität in Einklang bringen könnte – doch er bewies dabei das Gegenteil. Sein Resultat wurde zu einem der wichtigsten physikalischen Theoreme und revolutionierte unser Weltbild: Er konnte mathematisch zeigen, dass eine Theorie, die zu denselben Vorhersagen wie die Quantenmechanik führt, entweder mit dem Lokalitätsprinzip oder mit der freien Wahl der Messung unvereinbar ist.

Dieses erstaunliche Ergebnis ebnete den Weg für konkrete Tests, die so genannten Bell-Experimente. Die ursprünglich von Bell diskutierte Idee war ein Gedankenexperiment, ohne Hinweise darauf, wie man es mit den damaligen technischen Mitteln umsetzen sollte. Sein Ansatz ist inzwischen als CHSH-Versuch bekannt, benannt nach den US-amerikanischen Physikern John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony und Richard Holt, die erstmals eine praktische Verwirklichung vorschlugen. Tatsächlich lässt sich die Idee mittlerweile recht einfach realisieren: Man braucht zwei Experimentatoren, die an verschiedenen Orten Messungen durchführen. Anschließend untersucht man, wie die Messergebnisse der beiden Wissenschaftler zusammenhängen, indem man ihre Korrelationen berechnet. Liegen diese über einem bestimmten Schwellenwert (ihre Stärke ergibt sich durch eine so genannte bellsche Ungleichung), dann lassen sie sich nicht auf klassische Weise erklären, wenn man sowohl an der Lokalität als auch an der freien Wahl der Messung festhält. Trotz der simplen Umsetzung ist allerdings die Argumentation, weshalb die Ergebnisse der Intuition widersprechen, im CHSH-Versuch recht komplex.



POHLA SCIENCE OKTOBER 2021

BELL-NICHTLOKALITÄT In den Bell-Experimenten verwendet man eine einzige Quelle, die verschrankte Photonen erzeugt. Mit zwei Beobachtern handelt es sich um ein CHSH-Experiment (a), bei drei um ein GHZ-Experiment (b). Indem man die Korrelationen zwischen den Messergebnissen berechnet hat, konnte man beweisen, dass die Quantenmechanik nichtlokal ist.

Ein anderes Bell-Experiment, der nach den Physikern Daniel Greenberger, Michael Horne und Anton Zeilinger benannte GHZ-Versuch, erweist sich dabei als hilfreicher. Der Aufbau ist zwar etwas komplizierter als bei CHSH, doch es lässt sich besser nachvollziehen, warum das klassische Verständnis versagt.

In der Praxis arbeiten Physikerinnen und Physiker meist mit Photonen, deren Polarisation sie bestimmen. Zur Veranschaulichung beschreiben wir das Experiment aber mit Katzen und ersetzen den Polarisationszustand durch eine Farbe, wobei wir die quantenmechanischen Gesetzmäßigkeiten jedoch beibehalten. Demnach wäre es möglich, entweder die Farbe des Fells (F) oder der Augen (A) zu messen, um jeweils ein grünes (g) oder rosafarbenes (r) Ergebnis zu finden.

Messungen an Quantenkatzen

Das Experiment läuft wie folgt ab. Eine Quelle erzeugt drei Quantenkatzen in einem ganz bestimmten Zustand. Diese kommen dann zu drei Messgeräten, die sich in verschiedenen, weit voneinander entfernten Räumen befinden. Drei Wissenschaftlerinnen (Ada, Bea und Clara) bedienen die Geräte und bestimmen zeitgleich entweder die Fell- oder Augenfarbe. Denn die Gesetze der Quantenmechanik besagen, dass es unmöglich ist, beide Eigenschaften gleichzeitig zu untersuchen. Jede Forscherin wählt das, was sie messen möchte, unabhängig davon, ob ihre Kolleginnen darüber zu informieren. Um das sicherzustellen, lässt man sie beispielsweise eine Münze werfen, Kopf steht dann für Fell- und Zahl für Augenfarbe.

Die Quantenmechanik sagt in diesem Fall folgende Ausgänge voraus: Messen alle Wissenschaftlerinnen die Farbe des Fells, finden sie eine ungerade Anzahl (1 oder 3) grün und folglich eine gerade Anzahl (0 oder 2) rosa. Bestimmt hingegen nur eine Wissenschaftlerin die Farbe des Fells und die beiden anderen die Augen, ergibt sich eine gerade Anzahl (0 oder 2) grün und somit eine ungerade Anzahl (1 oder 3) rosa. Die Quantenmechanik prognostiziert

auch die Resultate, falls sich alle auf die Augen konzentrieren oder wenn nur eine Person die Augen und die beiden anderen das Fell untersuchen – aber diese Situationen sind für die folgende Argumentation nicht relevant.

Der Versuch wird häufig wiederholt, und die Ergebnisse der Forscherinnen folgen genau den theoretischen Vorhersagen. Nun kann man sich vorstellen, dass ein Detektiv das Experiment beobachtet. Entsprechend seiner Erfahrung mit der makroskopischen Welt sucht er nach einer Erklärung für die ungewöhnliche Verteilung, die sich von jener klassischer Zufallsereignisse unterscheidet. Dabei stützt er sich insbesondere auf die Prinzipien der Lokalität (die Ergebnisse können sich über die Distanz hinweg nicht beeinflussen) und die freie Wahl der Messung (der Münzwurf unterliegt keinem äußereren Einfluss).

Der Detektiv hat keine Ahnung, wie das Experiment funktioniert. Er hat lediglich Zugang zu den aufeinanderfolgenden Münzwürfen der Wissenschaftlerinnen und den Messergebnissen. Dadurch kann er feststellen, dass die von der Theorie vorhergesagten Fälle zutreffen: Messen alle Forscherinnen das Fell, gibt es eine ungerade Anzahl grün; wenn hingegen nur eine die Fellfarbe bestimmt, erhalten sie eine gerade Anzahl grün. Und das, unabhängig davon, wie oft man die Versuche durchspielt. Offenbar sind die Ergebnisse der drei Experimentatorinnen also korreliert.

Es gibt nur zwei Möglichkeiten, das zu erklären: Entweder verbindet eine gemeinsame Ursache die seltsamen Resultate oder die Messgeräte kommunizieren miteinander, zum Beispiel sendet Adas Gerät Informationen (Fell oder Augenfarbe) an Beas Aufbau. Da die Messungen jedoch zeitgleich an verschiedenen Orten stattfinden, schließt das Prinzip der Lokalität die zweite Erklärung aus, denn die

Daten müssten dafür ohne jegliche Verzögerung übermittelt werden.

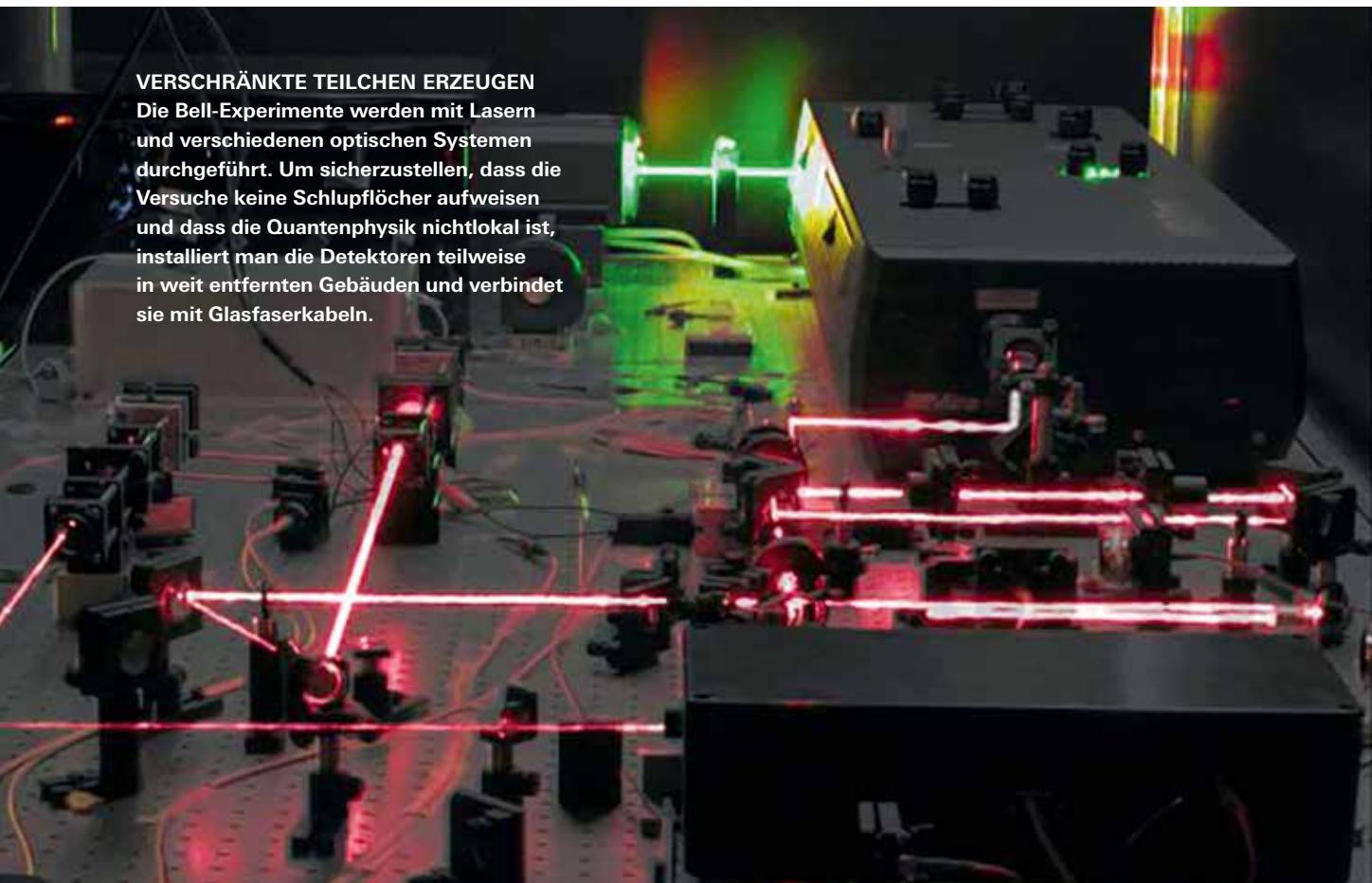
Somit kommt der Detektiv zu dem Schluss, dass die Ergebnisse einer gemeinsamen Ursache unterliegen. Vielleicht erzeugt die Quelle ja nur bestimmte Arten von Katzentrios, die zu den Resultaten passen.

Um die Vorgänge genau nachzuvollziehen, listet der Detektiv alle möglichen Katzenkonfigurationen auf, welche die drei Forscherinnen vorfinden können. Es gibt vier Arten von Tieren (grün mit grünen Augen, grün mit rosa Augen, rosa mit grünen Augen und rosa mit rosa Augen) und drei Messstationen, woraus sich insgesamt $4^3 = 64$ Kombinationen ergeben. Anschließend betrachtet er jedes Katzentrio einzeln und spielt durch, was herauskommt, wenn die Wissenschaftlerinnen ihren Münzwurf tätigen. Dafür muss er nochmals $2^3 = 8$ verschiedene Messmöglichkeiten pro Wurf berücksichtigen.

Erstaunlicherweise gibt es jedes Mal eine Messung, die den Beobachtungen (und damit den oben aufgeführten Vorhersagen der Quantenmechanik) widerspricht. Um das zu verstehen, kann man ein konkretes Beispiel betrachten, etwa wenn Ada eine rosa Katze mit grünen Augen und Bea und Charlotte grüne Katzen mit rosa Augen erhalten. Schreiben die Münzwürfe allen Forscherinnen vor, das Fell zu messen, würden sie zweimal g finden – was nicht zu den theoretischen Berechnungen passt (für dreimal F ist die Anzahl der Ergebnisse g entweder 1 oder 3). Bei jedem Katzentrio, das sich konstruieren lässt, gibt es eine ähnliche Situation. Man findet stets Münzwürfe, die zu einem in der Quantenmechanik »verbotenen« Resultat führen würden. Aber egal, wie häufig man die Versuche wiederholt, diese Katzen-Münz-wurf-Kombinationen tauchen niemals auf!

VERSCHRÄNKTE TEILCHEN ERZEUGEN
Die Bell-Experimente werden mit Lasern und verschiedenen optischen Systemen durchgeführt. Um sicherzustellen, dass die Versuche keine Schlupflöcher aufweisen und dass die Quantenphysik nichtlokal ist, installiert man die Detektoren teilweise in weit entfernten Gebäuden und verbindet sie mit Glasfaserkabeln.

UNIVERSITÄT GENF



Kommunikationsschwierigkeiten mit Schrödingers Katze

Eine Schwierigkeit in der Quantenphysik ist es, beobachtete Phänomene in Worte zu fassen. Schrödingers Katze und die Katzen aus dem GHZ-Experiment sind ein gutes Beispiel dafür.

Wenn ein Detektiv versucht, den Versuch zu interpretieren, wird er den Vorgängen sein klassisches Verständnis überstülpen. Demnach hat das Fell der Katze, während sie durch den Tunnel des Aufbaus

läuft, eine eindeutige Färbung: grün oder rosa.

In der Quantenphysik gilt das allerdings nicht mehr. Die Fellfarbe einer Quantenkatze ist zwar messbar, aber es macht keinen Sinn, sich zu fragen, welche Farbe sie während des Spaziergangs im Tunnel hat. Die Färbung existiert nicht, solange sie nicht gemessen wird. Somit ist es auch nicht möglich, wie der Detektiv eine Farb-

möglichkeit nach der anderen zu analysieren.

Man muss daher eine neue Bezeichnung erfinden, um die Eigenschaft Fellfarbe zu charakterisieren, bevor sie bestimmt wird. Physiker greifen dafür meist auf »und« zurück. Das Fell der Katze, die durch den Tunnel geht, ist »grün und rosa«. Gleches gilt bei Schrödingers Katze: Sie ist »tot und lebendig«.

Somit muss der Detektiv seinen ursprünglichen Erklärungsversuch aufgeben. Es gibt nur zwei mögliche Schlüsse: Entweder die Ergebnisse des Münzwurfs sind nicht unabhängig oder die Lokalität ist hinfällig. Egal wofür er sich entscheidet, es erschüttert seine klassischen Überzeugungen.

Verschiedene Wege, die Versuche zu deuten

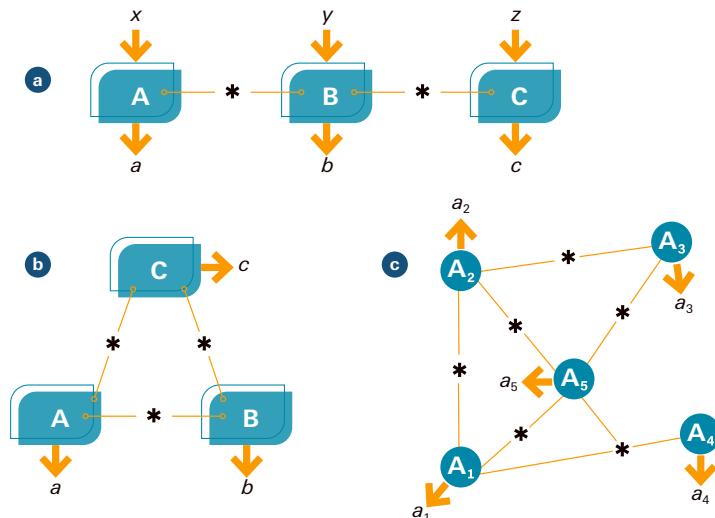
Nichts deutet darauf hin, welches der Prinzipien er verwerfen sollte. Die verbreitetste Interpretation der Quantenmechanik, die so genannte Kopenhagener Deutung, verzichtet auf Lokalität. Damit stellt man in Frage, dass die drei Katzen unabhängig voneinander getrennte Wege gehen und sich jeweils als lokale Einheit ansehen lassen. Tatsächlich kann man sie nur als Gesamtsystem betrachten, die sich selbst über große Distanzen hinweg gegenseitig augenblicklich beeinflussen können. Bis zum Zeitpunkt der Messung befinden sie sich in überlagerten Zuständen, das heißt, ihre genaue Fell- und Augenfarbe ist noch nicht festgelegt. Sobald aber das Fell eines Tiers bestimmt wird, wirkt sich das instantan auf die Farbe der anderen aus. In der Physik nennt man ein solches System »verschränkt«.

In den 1960er Jahren ließ sich das GHZ-Experiment aus technischen Gründen noch nicht umsetzen.

NICHTLOKALITÄT IN NETZWERKEN Die Topologie von Netzwerken mit mehreren unabhängigen Photonenquellen ist äußerst vielfältig. Im Bilokalitätsexperiment **a** setzt man zwei Quellen zwischen drei Beobachter. B führt eine simultane Messung an den beiden emittierten Lichtteilchen durch, die C empfängt. Im dreieckigen Aufbau mit drei Quellen **b** erhält jeder der drei Experimentatoren zwei Photonen. Diese Systeme sind bereits extrem schwer zu untersuchen. Das Quanteninternet wird jedoch aus weitaus mehr unabhängigen Quellen bestehen (zum Beispiel **c**, ein Netzwerk mit sechs Quellen), was weitere Forschungen notwendig macht.

Und selbst heute ist es schwierig zu realisieren. Um verschrankte Photonen zu erzeugen, verwendet man durch Laser angeregte Kristalle. Diese strahlen dann mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zwei Lichtquanten mit den gewünschten Eigenschaften aus. Allerdings gibt es bisher noch keine gut beherrschbare Quelle, um ein verschranktes Trio zu schaffen. Deshalb ziehen Experimentalphysiker den CHSH-Versuch vor, der zu denselben Schlussfolgerungen führt, aber nur zwei Objekte und Messstationen benötigt.

Das CHSH-Experiment wurde schon mehrmals durchgeführt. Stuart Freedman und John Clauser verwirklichten es erstmals 1972; anschließend das Team von Alain Aspect 1981; und 1998 fand es unter der Leitung von einem von uns, Nicolas Gisin, in Genf statt. Diese frühen Umsetzungen wiesen technische Einschränkungen auf, wodurch man gewisse Schlupflöcher nicht vollständig ausschließen konnte: etwa durch Messgeräte, die zu nahe beieinander standen und somit Informationen austauschen können, oder ein zu großer Photonenverlust während der Übertragung, der die gemessenen Stichproben verzerren könnte, und so weiter. Ein klassischer Detektiv könnte



immer Erklärungen finden, um seine Überzeugungen beizubehalten. Daher zogen die Fachleute ihre entsprechenden Schlussfolgerungen stets unter dem Vorbehalt möglicher Fehler.

Dennoch gaben die Forscherinnen und Forscher nicht auf und feilten an ausgeklügelteren Aufbauten. Schließlich überzeugte ab 2015 eine ganze Reihe von Experimenten auch die letzten Skeptiker. Technische Fortschritte räumten alle Zweifel aus und senkten die Wahrscheinlichkeit drastisch, dass die beobachteten Ergebnisse zu den klassischen Prinzipien passen. Für einen der Versuche schätzt man die Chance dafür auf weniger als 1 zu 10^{28} . Inzwischen zweifelt niemand mehr an, dass sich die Quantenmechanik unmöglich gleichzeitig mit dem Lokalitätsprinzip und der freien Wahl der Messung vereinbaren lässt.

Die Fachwelt hat jedoch nicht tatenlos auf die jüngsten experimentellen Errungenschaften gewartet, sondern in der Zwischenzeit auch die Nützlichkeit der seltsamen Quanteneffekte für verschiedene Anwendungen untersucht. So ist es möglich, die Nichtlokalität zu verwenden, um tatsächliche Zufallszahlen zu erzeugen. Denn welchen Zustand ein verschränktes Teilchen bei seiner Messung annehmen kann, ist vollkommen unklar und unterliegt – zumindest nach bisherigem Wissensstand – echtem Zufall. Zufallszahlengeneratoren spielen eine entscheidende Rolle in der Informatik, der Kryptografie sowie für Optimierungsalgorithmen und Glücksspiele. Mit herkömmlichen Systemen kann man zufälliges Verhalten nur simulieren: Die entstehenden Werte sind pseudozufällig, das heißt, sie lassen sich reproduzieren, wenn man den genauen Mechanismus kennt.

Darüber hinaus bildet Nichtlokalität die Grundlage für kryptografische Protokolle, bei denen eine ausgetauschte Nachricht gegen jeden Angriff gesichert ist, was in der klassischen Welt unmöglich ist. Wenn etwa jemand verschränkte Teilchen abgreift und misst, verlieren sie ihre besonderen Quanteneigenschaften, was der Empfänger sofort bemerkt. Dem Wunsch nach sicherer Kommunikation kommt das Quanteninternet nach, ein Netzwerk, das auf dem Austausch von verschränkten Photonen beruht. Im Vergleich mit Bell- und GHZ-Experimenten stellt ein solcher Aufbau eine technische Herausforderung dar, da man dafür viele Photonenquellen braucht. Es ist nicht möglich, ein derartiges Netzwerk mit nur einer Quelle zu entwerfen, die verschränkte Teilchen für zahlreiche Nutzer aussendet. Außerdem widerspricht die dezentrale Natur des Internets der Tatsache, sich auf einen einzigen Erzeuger zu fokussieren.

Aus theoretischer Sicht unterscheiden sich Quantensysteme, die auf mehreren unabhängigen Quellen aufgebaut sind, grundlegend von den GHZ- oder CHSH-Experimenten. Es ist unklar, wie sich die Nichtlokalität in dieser Situation äußert. Um das zu untersuchen, widmen sich Forscherinnen und Forscher zunächst möglichst einfachen Netzwerken, doch selbst da stoßen sie schnell an ihre Grenzen.

Denn sogar der simpelste Aufbau in Form eines Dreiecks, bei dem sich die Wissenschaftlerinnen an den Ecken befinden und die drei unabhängigen Photonenquellen auf je einer Seite des Dreiecks liegen, bereitet große Schwierigkeiten. Angenommen, jede Physikerin misst die Teilchen,

Verschränkte Messungen

Inzwischen kennt fast jeder Schrödingers Katze, die sowohl tot als auch lebendig ist. Dieses Gedankenexperiment veranschaulicht, dass sich messbare Quanteneigenschaften in mehreren Zuständen zugleich befinden können. Das Fell einer Katze kann rosa und grün sein, sie kann von links und rechts angelaufen kommen. Anders als viele glauben, definiert die Quantenphysik diese Verschränkung genau: Um Schrödingers Katze exakt zu beschreiben, müsste man zum Beispiel sagen, dass sie maximal positiv verschränkt zwischen dem toten und dem lebendigen Zustand ist. Genauso gut könnte sie aber auch maximal negativ verschränkt sein. Der Unterschied, den es nur in der Quantenwelt gibt, macht sich bemerkbar, wenn mehrere Tiere miteinander wechselwirken. Die zwei Zustände sind so verschieden wie tot und lebendig, wodurch man sie durch Messungen differenzieren kann.

Wenn Ada nun eine einzelne Katze erhält, die auf zwei Wegen zu ihr gelangen kann, entweder von links oder rechts, könnte sie untersuchen, woher diese kommt. Die Quantenphysik ermöglicht aber auch noch eine andere Art von Messung, für die es keine klassische Entsprechung gibt: Sie kann etwa bestimmen, ob die Katze auf einem »maximal positiv zwischen dem linken und dem rechten Weg verschränkten Pfad« ist, oder »maximal negativ zwischen dem linken und dem rechten Weg«.

Nach einer solchen verschränkten Messung weiß Ada zwar nicht, ob die Katze von links oder von rechts kam. Sie erhält dennoch die gleiche Menge an Informationen, die in den Wörtern positiv oder negativ steckt.

die sie von zwei verschiedenen Quellen erhält. Ada bekommt etwa zwei Quantenkatzen und führt eine bestimmte Messung durch, an der beide Tiere beteiligt sind (sie könnte untersuchen, ob sie gleichfarbig sind). Bea und Clara machen das Gleiche. Trotz des simplen Aufbaus ist es schwer, alle möglichen Strategien zu erforschen, die man bei diesem Versuch verfolgen könnte, um die Nichtlokalität eindeutig nachzuweisen.

Bisher gelang es nicht, ein Protokoll wie bei den einfacheren GHZ- oder CHSH-Experimenten zu entwickeln, damit sich die Ergebnisse erklären lassen. Stets waren in der dreieckigen Topologie mit drei unabhängigen Quellen Schlupflöcher vorhanden, die ein Detektiv nutzen könnte, um die Resultate klassisch zu interpretieren. So bleibt die Herausforderung für die Zukunft, herauszufinden, welches Experiment bei einem gegebenen Aufbau zu nichtlokalen Phänomenen führt – und wie man das beweisen kann.

Seit etwa zehn Jahren denken sich Physikerinnen und Physiker konkrete Beispiele für Versuche aus, um diesem Ziel näher zu kommen. 2010 haben Cyril Branciard, jetzt am Néel-Institut in Grenoble, und seine Kollegen (darunter Nicolas Gisin) eine neue Art von Quantenexperimenten ins Auge gefasst, so genannte Bilokalitätsversuche mit zwei unabhängigen Photonenquellen. Dabei sind die drei Forscherinnen in einer Reihe angeordnet, wobei sich zwischen erster und zweiter sowie zweiter und dritter Experimentatorin je eine Quelle befindet, die verschränkte Teilchen aussendet. Wie das Team zeigte, lassen sich die erwarteten Messergebnisse für einen Detektiv unmöglich klassisch erklären. In diesem Fall ähneln die Korrelationen jenen, die in bekannten Bell-Experimenten auftauchen. Dennoch stellt der Aufbau einen ersten Schritt in Richtung eines Netzwerks mit mehreren Quellen dar. Doch bis zum Quanteninternet fehlt noch ein entscheidender Punkt: Die Messungen sollten verschränkt sein. Die Idee dahinter erinnert an Schrödingers Gedankenexperiment mit einer Katze, die sowohl tot als auch lebendig ist – jedoch auf Messgeräte angewandt. Beispielsweise könnte man ein Teilchen messen, das gleichzeitig von links und von rechts kommt (siehe »Verschränkte Messungen«).

Nichtlokalität in dreieckigen Netzwerken

Die Suche nach weiteren Beispielen für Quantennetzwerke führte Physiker zu den bereits genannten Dreiecksnetzen. 2012 machte Tobias Fritz, damals am ICFO in Barcelona, eine wichtige Entdeckung. In Anlehnung an das CHSH-Experiment, an dem nur zwei Wissenschaftlerinnen beteiligt sind, gelang es ihm, ein Szenario für Nichtlokalität im Dreiecksgitter zu konstruieren. Dafür erhalten Ada und Bea in einem CHSH-Aufbau Zufallszahlengeneratoren. Das Ergebnis des Generators entscheidet darüber, welches Merkmal der Quantenkatzen beziehungsweise Photonen sie bestimmen. Die Zufallszahl und das Messergebnis übermitteln sie dann jeweils an Clara.

Die drei Forscherinnen sind damit über drei Quellen (jene wie in CHSH zwischen Ada und Bea sowie die beiden Zufallszahlengeneratoren) in einem dreieckigen Netzwerk miteinander verbunden. Jede der Wissenschaftlerinnen wird gebeten, zwei Daten zu veröffentlichen: Ada und Bea ihre jeweiligen Zufallswerte und Messergebnisse, Clara die beiden Zufallszahlen, die sie von Ada und Bea erhalten hat. Die Messwerte von Ada und Bea hängen also von Claras Zahlen ab.

Damit würde ein Detektiv, der den Aufbau kennt, Parallelen zu einem CHSH-Versuch erkennen, der durch die bell-schen Ungleichungen bestimmt wird. Er wird die Ergebnisse deshalb nicht auf klassische Weise erklären können, wenn sie das Lokalitätsprinzip erfüllen sollen. Das Einzige, was dieses Experiment vom gewöhnlichen CHSH-Aufbau unterscheidet, ist Clara. Sie stellt sicher, dass es keine freie Wahl der Messung gibt, die in Netzwerken überraschenderweise überflüssig zu sein scheint. Die freie Wahl wird hier durch die Annahme ersetzt, es gebe unabhängige Quellen.

Zusammen mit Elisa Bäumer, Sadra Boreiri und Salman Beigi haben wir uns ebenfalls dem Dreiecksnetz zuge-

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema:
spektrum.de/t/quantenphysik



PETER JURIK / STOCKADORE.COM

wandt, wobei wir das Problem so weit wie möglich vereinfacht haben. Wir betrachteten drei Quellen, die identische verschränkte Zustände an drei Beobachter aussenden, welche die gleiche Messung durchführen. Wie bereits erwähnt, ist die Wahl der experimentellen Anordnung und der Messstrategie entscheidend: In allen bisher bekannten Fällen (mit Ausnahme des zuvor beschriebenen Beispiels) waren die erhaltenen Korrelationen entweder lokal oder die Nichtlokalität ließ sich nicht nachweisen. Mit einer geschickten Auswahl an Messungen, die selbst auch verschränkt waren (siehe »Verschränkte Messungen«), haben wir erstmals ein Beispiel für ein nichtlokales Quantenexperiment im dreieckigen Netzwerk vorgeschlagen, das dabei nicht auf den bisher bekannten Bell-Experimenten (mit einer einzigen Quelle) basiert.

Das Ergebnis enthält alle für ein Quantennetzwerk zu erwartenden Merkmale: verschränkte Zustände und verschränkte Messungen. Mit unserem dazugehörigen Beweis deutet das darauf hin, dass sich der Ansatz grundlegend von Standard-Bell-Versuchen wie CHSH- oder GHZ unterscheiden könnte. Diese Behauptung wird durch zahlreiche Argumente gestützt, muss aber noch formal bewiesen werden.

Zwar ist ein solcher Aufbau weit von einem komplexen Netzwerk wie dem Internet entfernt, doch das Beispiel hat bereits viele interessante Aspekte. Die Anordnung der quantenmechanischen Elemente ist in sich geschlossen, was mathematisch schwer zu behandeln ist. Und genau wie das Experiment von Tobias Fritz basiert unseres nicht auf der freien Wahl des Messwerts, wodurch man das System als Zufallszahlengenerator betrachten kann.

Da die einfachste Ausprägung von Nichtlokalität in Bell-Versuchen bereits verschiedene Anwendungen ermöglicht hat, könnten Netzwerke – seien es dreieckige oder komplexere – ebenfalls zu spannenden technischen Umsetzungen führen. Und indem Wissenschaftler durch Gedanken- und reale Experimente zunehmend eine Intuition für die Quantenphysik entwickeln, wird daraus eines Tages vielleicht auch ein Quanteninternet hervorgehen. ▶

QUELLEN

Branciard, C. et al.: Characterizing the nonlocal correlations created via entanglement swapping. *Physical Review Letters* 104, 2010

Fritz, T.: Beyond Bell's theorem II: Scenarios with arbitrary causal structure. *Communication of Mathematical Physics* 341, 2016

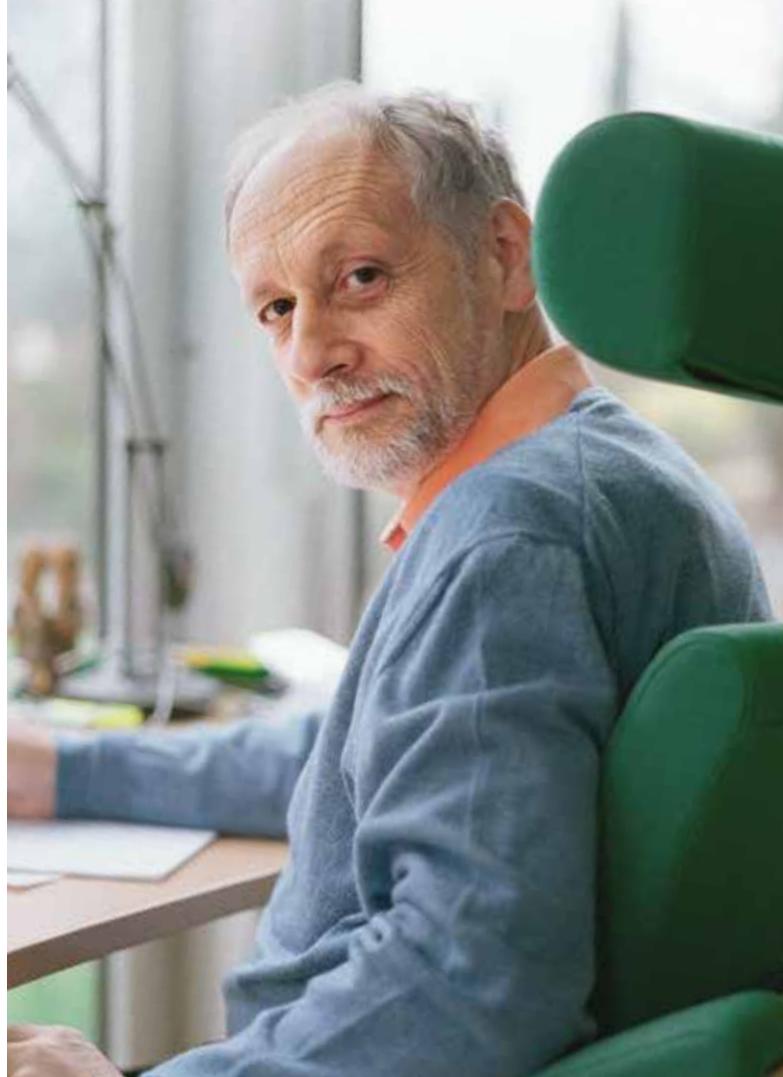
Renou, M.O. et al.: Genuine quantum nonlocality in the triangle network. *Physical Review Letters* 123, 2019

INTERVIEW

»ES STEHT VIEL AUF DEM SPIEL«

Ein Internet der Zukunft, das sich die Gesetze der Quantenphysik zu Nutze macht, könnte die digitale Kommunikation sichern. Der Physiker Nicolas Gisin erklärt, was es damit auf sich hat, und erläutert die jüngsten Fortschritte.

► spektrum.de/artikel/2021566



CAROLE PARIDI, MIT FOTO GEN. VON NICOLAS GISIN

Herr Gisin, was ist das Quanteninternet?

Dafür muss man zunächst das heutige Internet verstehen, das in den letzten Jahrzehnten explosionsartig angewachsen ist. Es wird geschätzt, dass im Januar 2021 fast 60 Prozent der Weltbevölkerung, das heißt etwa 4,6 Milliarden Menschen, Zugang dazu hatten. Es ist inzwischen ein fester Bestandteil unseres Lebens. Wir nutzen es jeden Tag, um verschiedene Arten von Daten, Texten, Bildern und Videos auszutauschen. Aus technischer Sicht handelt es sich um ein dezentralisiertes Netzwerk, das auf Knotenpunkten aufgebaut ist, die über den gesamten Globus verteilt und durch Glasfaserkabel miteinander verbunden sind. Die Informationseinheiten werden durch Lichtimpulse übertragen, die aus je etwa einer Million Photonen bestehen. Je nachdem, ob ein Signal empfangen wird oder nicht, nimmt die Informationseinheit, das Bit, den Wert eins oder null an.

Dieses Netzwerk funktioniert sehr gut. Aus konzeptieller Sicht stellt sich jedoch die Frage, wie weit sich die Lichtintensität reduzieren lässt. Die äußerste Grenze liegt darin, nur ein einziges Photon pro Impuls zu haben. Bei einer solchen Größenordnung gelten die Regeln der klassischen Physik nicht mehr, und man tritt in die faszinierende Welt der Quantenphysik ein.

Nicolas Gisin

ist Physiker mit Schwerpunkt Quantenmechanik und emeritierter Professor am Departement für angewandte Physik der Universität Genf und Schaffhausen Institute of Technology in Genf.

Was bedeutet das?

Ein Lichtteilchen kann sich in einer Überlagerung der Zustände null und eins befinden. Das heißt, es entspricht beiden Werten gleichzeitig. Dieses Phänomen verleiht dem System einen großen Reichtum: Das klassische Bit wird durch das Quantenbit ersetzt, das eine Quanteninformation (genannt Qubit) trägt. Die Idee des Quanteninternets besteht darin, das Glasfasernetz zum Austausch von Qubits zu nutzen. Den gleichen Gedanken findet man auch beim Computer: Viele Labore und Unternehmen arbeiten an Quantencomputern, die Qubits verarbeiten und damit Elektronenpakete, die durch Transistoren fließen, ersetzen. Solche Maschinen könnten bestimmte Berechnungen wesentlich schneller durchführen als herkömmliche Computer.

Und was sind die Vorteile des Quanteninternets?

Der erste betrifft die Datenmengen, die wir durch das Netz jagen. Diese hat sich in den letzten Jahren verzehnfacht. Könnte man die Information auf einzelne Photonen reduzieren, ließe sich die Übertragungsrate erhöhen. Das führt unmittelbar zu einem zweiten Argument, das jedoch mit Vorsicht zu genießen und als Ideal zu betrachten ist: Das Quanteninternet könnte weniger energieintensiv sein als das heutige Netz. Das Prinzip ist einfach – man verbraucht weniger Strom, um ein einzelnes Photon auszusenden, als ein ganzes Päckchen voller Lichtteilchen. Das Argument lässt sich natürlich auch auf Quantencomputer übertragen. Doch von diesem Ziel sind wir noch weit entfernt.

Warum?

Qubits sind zerbrechliche Objekte. Wenn sie mit ihrer Umgebung wechselwirken, verlieren sie ihren überlagerten Zustand und alle damit verbundenen Vorteile. Das ist als Dekohärenz bekannt, die insbesondere in Quantencomputern für Schwierigkeiten sorgt. Um den Quantenzustand des Qubits so lange wie möglich aufrechtzuerhalten, muss man den Computer auf Temperaturen von einem Bruchteil eines Grades über dem absoluten Nullpunkt kühlen.

Kältemaschinen verbrauchen aber viel Energie. Die Fortschritte auf dem Gebiet lassen jedoch hoffen, dass solche Technologien in Zukunft bei Raumtemperatur funktionieren werden. Das Quanteninternet ist etwas weniger anfällig für Dekohärenz. Einige der Elemente, die man vermutlich für das Netzwerk brauchen wird, müssen hingegen ebenfalls gekühlt werden und benötigen derzeit noch viel Energie.

Ein wichtiger Aspekt des Quanteninternets

soll die Sicherheit sein. Wieso?

Einzelne Photonen zu manipulieren, die den Gesetzen der Quantenphysik unterliegen, bringt einen erheblichen Vorteil mit sich: Man erhält automatisch Informationssicherheit. Das ist für mich das Hauptargument für diese Technologie. Wir sind bereits in der Lage, diese Eigenschaft zu nutzen, und es gibt keine andere Umsetzung, die so effizient ist. Alle digitalen Geräte, die in unserem Alltag allgegenwärtig sind (Computer, Handys und das klassische Internet), beherbergen Hintertüren, die staatlichen oder nicht staatlichen Spionen offen stehen. Sie können sensible Daten abfangen oder entwenden. Aktuell schützt man die Inhalte, indem man sie durch Verschlüsselungsalgorithmen unlesbar macht. Ohne Schlüssel lässt sich eine Nachricht nicht entziffern. Die entsprechenden Algorithmen beruhen auf mathematischen Problemen, die sich in angemessener Zeit nur schwer lösen lassen.

Zum Beispiel haben die US-amerikanischen Kryptologen Ronald Rivest und Leonard Adleman zusammen mit dem Israeli Adi Shamir 1977 die nach ihnen benannte RSA-Verschlüsselung entwickelt, mit der man inzwischen den elektronischen Handel sichert. Der Ansatz nutzt die Primfaktorzerlegung einer sehr großen Zahl (derzeit mit mindestens 309 Stellen), um den Chiffrierschlüssel zu definieren. Die Zahl ist zwar nicht geheim, aber ein Spion kann ihre Primfaktoren nicht so leicht finden, da es bis

heute keine klassische Methode gibt, welche die Aufgabe effizient lösen kann. Mit Quantencomputern könnte sich das jedoch ändern.

Aus welchem Grund?

1994 entwarf der amerikanische Mathematiker Peter Shor einen Quantenalgorithmus, der die Überlagerung von Qubits ausnutzt, um sehr schnell riesige Zahlen in ihre Primfaktoren zu zerlegen. Bisher verarbeiten Quantencomputer bestenfalls mehrere Dutzend Qubits; damit lässt sich das Programm nicht implementieren. In einigen Jahren werden die Maschinen jedoch leistungsfähig genug sein, was RSA-ähnliche Verschlüsselungen gefährden wird.

Es gibt aber andere kryptografische Methoden, »Post-Quanten-Verschlüsselungen«, die auf Problemen basieren, für die kein klassischer oder quantenmechanischer Algorithmus bekannt ist, der sie knackt. Das Risiko, dass ein solcher doch noch gefunden wird, besteht allerdings immer. Das Problem lässt sich umgehen, indem man Quanteneigenschaften ausnutzt, um Verschlüsselungsprotokolle zu entwickeln, die sich nicht angreifen lassen. Die so genannte Quantenkryptografie ermöglicht schon heute eine absolut sichere Kommunikation. Sie ist der fortschrittlichste Teil des Quanteninternets.

Was genau kann man sich unter Quantenkryptografie vorstellen?

Angenommen, Alice und Bob wollen einen sicheren Kommunikationskanal aufbauen. Dafür müssen sie zunächst einen Schlüssel teilen, der die Nachricht verschleiert und anschließend wieder lesbar macht. Die Idee ist hier, den Schlüssel mit Prinzipien der Quantenmechanik zu verteilen, also einen so genannten Quantenschlüsselaustausch (englisch: quantum key distribution, kurz: QKD) vorzunehmen. Denn sobald ein Beobachter ein Quantensystem misst, verändert er es. Wenn nun Alice den Schlüssel nach einem bestimmten Protokoll an Bob sendet, können sie feststellen, ob ein Spion den Code unterwegs abgefangen hat. In diesem Fall verwerfen sie den Schlüssel (der ohnehin keine Informationen enthält) und schicken sich so lange einen neuen, bis sie sicher sein können, dass er nicht ausgelesen wurde.

Die Kryptografie garantiert aber nicht, dass die Kommunikation stabil abläuft. Wenn ein Spion die Inhalte systematisch abfängt, kann man nicht korrespondieren. Quantenschlüsselaustausch gewährleistet aber Vertraulichkeit: Sobald man den Schlüssel ausgetauscht hat, sind die

»Quantenkryptografie ermöglicht schon heute eine absolut sichere Kommunikation«

Nachrichten sicher verschlüsselt und ein Dritter hat keine Möglichkeit, die Informationen zu stehlen. Das erste Protokoll für den Quantenschlüsselaustausch haben der US-Amerikaner Charles Bennett und der Kanadier Gilles Brassard 1984 vorgeschlagen.

Gibt es bereits kommerzielle Anwendungen des Quantenschlüsselaustauschs?

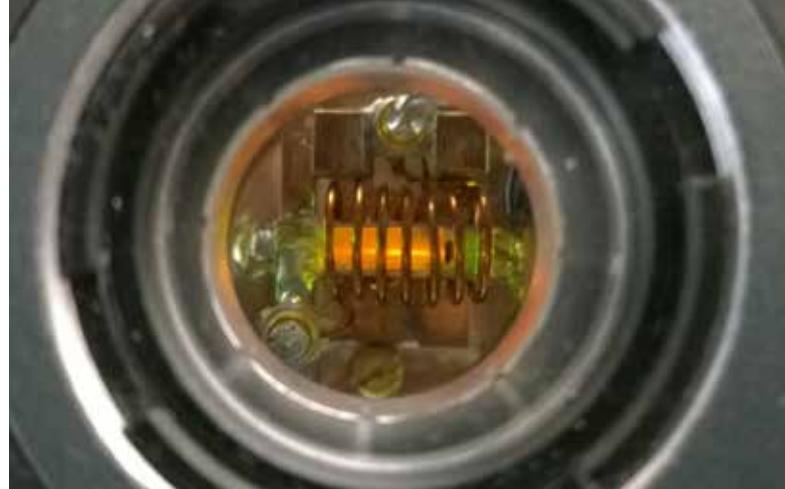
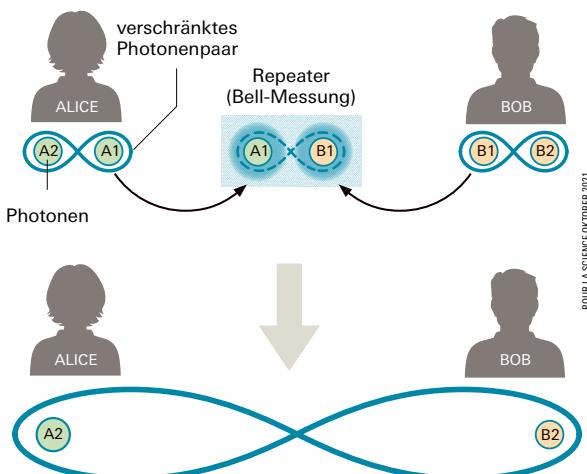
Weltweit bieten mehrere Unternehmen solche Quantenkommunikationssysteme an – und der Markt wächst schnell an. Vor knapp 20 Jahren habe ich mit Kollegen von der Universität Genf die Firma ID Quantique gegründet. Damals waren wir Pioniere auf dem Gebiet; man nahm uns aber nicht allzu ernst. Wir verkauften hauptsächlich Detektoren für einzelne Photonen und Quantenzufallszahlengeneratoren.

Letztere spielen auch bei der Sicherung von Daten eine wichtige Rolle. Sie sind für die Kryptografie von entscheidender Bedeutung, da man durch sie Verschlüsselungen auf vollkommen zufällige Weise erzeugen kann. Die meisten Generatoren stützen sich aktuell auf deterministische Algorithmen, die nur Pseudozufallszahlen liefern. Das heißt, wenn man den Code und das System gut kennt, lassen sich die Zahlen vorhersagen. Andere Ansätze basieren auf chaotischen physikalischen Phänomenen, diese dürfen aber nicht vorhersehbar sein, und oft erfordern sie eine Softwareverarbeitung, welche die Zufälligkeiten verändert kann. Auch hier schafft die Quantenphysik Abhilfe.

Wie das?

Die Idee ist einfach. Man schickt ein Photon auf einen teildurchlässigen Spiegel, der es reflektiert oder passieren lässt. Das Teilchen wird auf völlig unvorhersehbare Weise entweder auf der einen oder der anderen Seite des Spiegels erfasst. Abhängig davon codiert man es durch eine Null oder eine Eins.

QUANTEN-TELEPORTATION Indem man einzelne Komponenten von verschrankten Teilchenpaaren wieder miteinander verschrankt, kann man Quantenschlüssel sicher austauschen.



UNIVERSITÄT GENF

QUANTENSPEICHER Das Team um Nicolas Gisin an der Universität Genf hat einen Quantenspeicher entworfen. Der Kristall enthält Atome von Ytterbium, einem Element aus der Familie der seltenen Erden. Die Teilchen werden in ihrem Grundzustand gehalten, indem man sie auf einige Kelvin abkühlt. Das System kann ein Photon absorbieren und wenig später ein anderes mit denselben Quanteneigenschaften aussenden.

Anfangs passten solche Zufallszahlengeneratoren in kleine Gehäuse. Dank dieser Miniaturisierungstechniken findet man sie nun in zwei Millimeter großen Chips. Samsung baut sie bereits in seine in Südkorea vertriebenen Geräte ein. Insbesondere im Bankwesen verwendet man sie, um die Kommunikation zu verschlüsseln. In drei bis fünf Jahren sollen sie in allen Samsung-Telefonen implementiert werden.

Datensicherheit spielt schon immer eine wichtige Rolle.

Aber in den letzten Jahrzehnten ist das Thema zu einer geopolitischen Herausforderung geworden. Alle Großmächte und großen Unternehmen haben ein Programm zur Quantenkryptografie. Südkorea besitzt bereits ein landesweites Netz, das einige Städte miteinander verbindet, und auch Europa hat ein ähnliches Projekt in der Pipeline. Der Markt für Quantenkommunikation ist gerade dabei abzuheben. Bei ID Quantique stellen Systeme zur Quantenschlüsselverteilung heute beispielsweise das Hauptgeschäft dar. Kunden sind vor allem Finanzinstitute oder Regierungen, die ihre Ministerien miteinander verbinden möchten.

Kann man also bereits von einem Quanteninternet sprechen?

Nein, die Quantenkommunikation mit QKD ist nur ein erster Schritt. Beim Quanteninternet geht es um zwei Dinge: Informationen über große Entfernungen übertragen und Quantencomputer miteinander verbinden. Das größte Hindernis auf diesem Weg ist der Signalverlust in den Glasfasern. Bei ihrer herkömmlichen Verwendung verlieren die Lichtimpulse nach 100 Kilometer 99 Prozent ihrer Photonen, so dass immerhin noch 1000 übrig bleiben. Um die Daten weiterzutragen, setzt man optische Verstärker ein, die dem Signal wieder Intensität verleihen. Bei gewöhnlicher Kommunikation ist die Lösung sehr effizient. Für ein

Quantensystem bedeutet ein solcher Prozess allerdings, dass die Qubits gemessen werden, das heißt, ihr Überlagerungszustand verschwindet. Für ein Quanteninternet muss man aber die Informationseinheiten über Entfernungen von Kontinenten oder sogar der ganzen Welt übertragen können!

Wie soll das gelingen?

Der einfachste Ansatz ist die Verwendung von »vertrauenswürdigen Knoten«. Angenommen, Alice möchte Qubits an Bob senden, der mehr als 100 Kilometer von ihrem Haus entfernt wohnt. Sie sendet ihre Photonen an einen Vermittler, Charlie, der sich in halber Entfernung befindet. Er entschlüsselt Alices Nachricht und übermittelt sie dann mit einer neuen Chiffrierung an Bob. Das lässt sich leicht bewerkstelligen. In China hat man diese Idee bereits eindrucksvoll demonstriert. Dort gibt es ein 2000 Kilometer langes Netz, das Peking mit Schanghai verbindet und 32 vertrauenswürdige Knotenpunkte verwendet. Doch das Risiko für die Informationssicherheit ist offensichtlich: Jeder Zwischenknoten ist eine Schwachstelle, die ein Spion ausnutzen kann. Um den Datenschutz auf der gesamten Strecke zu gewährleisten (und auch Quantencomputer optimal zu verbinden), braucht man eine andere Technik: Quantenrepeater.

Wie funktioniert das?

Zunächst braucht man die Quantenverschränkung. In der Quantenphysik können zwei Objekte so stark korrelierte Eigenschaften haben, dass sie sich mathematisch nicht getrennt beschreiben lassen. Befindet sich das Paar in einem überlagerten Zustand und man misst eines der Objekte, beeinflusst das sofort die Merkmale des anderen, selbst wenn sie sehr weit voneinander entfernt sind – im praktischen Fall des Quanteninternets typischerweise Hunderte von Kilometern. Diese Korrelationen lassen sich nicht durch die klassische Physik erklären, sie sind rein quantenphysikalischer Natur.

Wenn die Distanz zwischen Alice und Bob nicht allzu groß ist, können sie den Quantenschlüsselaustausch mit einer Quelle für Photonenpaare durchführen, deren Polarisation beispielsweise immer senkrecht zueinander ist. Die Quelle kann sich überall auf der Strecke von Alice und Bob befinden: auf halbem Weg, bei Bob zu Hause und so weiter. Wenn Alice die Polarisation des empfangenen Photons bestimmt, weiß sie, wie das Teilchen polarisiert ist, das bei Bob ankommt. Dann können sie wie zuvor eine Verschlüsselung erzeugen: Bob führt seine Messungen mit zwei Polarisatoren durch und Alice sagt ihm, welche Lichtteilchen er zur Bildung des Schlüssels behalten muss.

Aber wie setzt man das um, wenn Alice und Bob mehrere hundert Kilometer voneinander entfernt sind?

Die Photonenquelle allein löst das Problem des Signalverlusts in der Faser nicht. Die Lösung ist die Quantenteleportation, ein Kommunikationsprotokoll, das auf der Quantenverschränkung beruht. Angenommen, Alice und Bob können Photonen an Charlie schicken, der als Quantenrepeater

fungiert. Alice und Bob sind jeweils mit einer Quelle für verschränkte Photonenpaare ausgestattet, A_1, A_2 beziehungsweise B_1, B_2 . Sie senden die Lichtquanten A_1 und B_1 an Charlie, der eine spezielle simultane Messung (eine so genannte Bell-Messung) durchführt, welche die Teilchen verschränkt. Die Gesetze der Quantenphysik besagen, dass die zwei anderen Photonen A_2 und B_2 , die bei Alice und Bob geblieben sind, dann ebenfalls ein verschränktes Paar bilden. Das Ergebnis: Alice und Bob teilen sich ein Photonenpaar, dessen Polarisation sie messen können, um einen Schlüssel zu erzeugen.

Was genau ist der Vorteil dieses Ansatzes?

Seine Stärke besteht darin, dass er sich verallgemeinern lässt: Man kann so viele Repeater wie nötig aufstellen, um die Distanz zwischen Alice und Bob zu überbrücken. Quantenrepeater unterscheiden sich von vertrauenswürdigen

Der Quantenschlüsselaustausch

Die Quantenkryptografie beruht auf einem sicheren Austausch von Schlüsseln zwischen zwei Gesprächspartnern, die traditionell Alice und Bob genannt werden. In der einfachsten Version schickt Alice eine Folge von polarisierten Photonen (horizontal, vertikal oder entlang der Diagonalen, die jeweils ein Bit 0, 1, 0 und 1 codieren) an Bob. Dieser leitet jedes Lichtquant, das er empfängt, durch einen der zwei ihm zur Verfügung stehenden Polarisatoren, die er zufällig auswählt. Der erste Filter lässt die horizontale und vertikale Polarisation durch, der zweite die beiden diagonalen.

Bob teilt Alice dann öffentlich mit, welche Reihenfolge von Polarisatoren er genutzt hat. Sie antwortet ihm (ebenfalls öffentlich), welche der gemessenen Lichtteilchen er behalten soll: diejenigen, bei denen eine der beiden Achsen des verwendeten Polarisators auf die Polarisation des Photons ausgerichtet war. Welches das war, weiß nur Alice.

Mit diesen Teilchen erstellen Alice und Bob eine Folge von Bits, die ihr gemeinsamer Schlüssel sein wird. Da Bobs Messapparate zwei Arten von Lichtquanten durchlassen, die jeweils 0 oder 1 entsprechen, kann ein Spion, selbst wenn er die Liste von Bobs Polarisatoren kennt, den Schlüssel nicht rekonstruieren.

Der wichtige Punkt ist, dass ein Spion, der die Photonen des Schlüssels auf ihrem Weg abfängt, ihre Polarisation und damit Bobs Messungen verfälschen würde. Wenn Alice und Bob nun zuvor bestimmte Sequenzen des Signals vergleichen und dabei zu viele Fehler feststellen, schließen sie daraus, dass ein Feind eingegriffen hat. Sie schicken sich dann einen neuen Schlüssel.

»Europa beginnt erst jetzt, auf die Konkurrenz zu reagieren«

Knoten, weil sie keinen Zugriff auf die geteilte Information haben. Ein Spion kann den Schlüssel nicht abfangen, indem er einen Repeater infiltriert. 1997 führten die Teams von Francesco de Martini an der Universität Rom und Anton Zeilinger an der Universität Innsbruck die ersten Experimente zur Quantenteleportation im Labor durch. Die Bell-Messung erfolgte lange nach der Emission der Photonen, die sich somit in mehreren hundert Metern Entfernung befanden, als die Teleportation einsetzte.

Sind Quantenrepeater also schon umsetzbar?

In Laborexperimenten werden die von Charlie empfangenen Photonen so synchronisiert, dass sie gleichzeitig ankommen, um die Bell-Messung durchzuführen. Unter realen Bedingungen ist das jedoch nicht so. Man muss das zuerst eintreffende Photon speichern können, während man auf das zweite wartet. Und das ist außerordentlich schwierig.

Wie kann man das tun, ohne das Qubit zu zerstören?

An der Universität Genf begann unsere Gruppe 2008 Quantenspeicher zu entwickeln, die auf Kristallen basieren. Diese kühlen wir auf wenige Kelvin ab, damit sich alle Atome im Grundzustand befinden. Die Energiedifferenz zum ersten angeregten Zustand entspricht der Energie des Photons, das aufgenommen werden kann. Da die Wahrscheinlichkeit, vom ersten Atom absorbiert zu werden, nicht 100 Prozent beträgt, kann auch erst das zweite, dritte, vierte, ... Atom es schlucken. Das System befindet sich daher in einer Überlagerung mit dem ersten angeregten Atom, dem zweiten, dem dritten und so weiter. Zudem präparieren wir die Teilchen so, dass sie eine Art Uhr definieren, die anzeigt, wann das System wieder in den Grundzustand übergeht und ein neues Lichtquant freisetzt. Dieses muss alle Quanteneigenschaften (Überlagerung und Verschränkung) des zuvor eingefallenen Photons aufweisen und in die richtige Richtung emittiert werden, sonst geht es verloren.

Wo ist hier der aktuelle Stand der Forschung?

Mehrere Teams haben auf diese Weise funktionierende Prototypen von Quantenspeichern erzeugt. Die Herausforderung besteht darin, eine hohe Effizienz (wir können etwa zehn Prozent der einfallenden Photonen wiederherstellen) mit möglichst langen Speicherzeiten zu kombinieren, im Bereich von Zehntelsekunden. Die Quantenspeicher in meinem Labor verwenden Kristalle, die kaum einen Zentimeter groß sind. Aber sie sind regelrechte »Fabriken«, da wir sie massiv kühlen müssen. Auch wenn wir von einer Kommerzialisierung derartiger Geräte noch weit entfernt sind, sind die Fortschritte der letzten Jahre ermutigend. Für Physiker sind Quantenspeicher faszinierend. Es ist erstaunlich, dass

sich der Quantenzustand einzelner Photonen mit solcher Präzision manipulieren lässt. Zudem kann man die Geräte durch den Austausch von Lichtteilchen miteinander verbinden: So erhält man makroskopische Objekte, die irgendwann hunderte Kilometer voneinander entfernt sind!

Lassen sich hier auch Satelliten nutzen, um über weite Distanzen zu kommunizieren?

In diesem Bereich ist uns China einen Schritt voraus. Dort zögert man nicht, Risiken einzugehen, zu investieren und Forschern außergewöhnliche Mittel zur Verfügung zu stellen. Auf diese Weise hat China die westlichen Länder ein- und sogar überholt. Europa beginnt erst jetzt, auf die Konkurrenz zu reagieren. Man muss aber auf einen entscheidenden Unterschied hinweisen: Der chinesische Staat ist der erste Kunde der technologischen Entwicklungen und unterstützt sie daher aktiv. In Europa soll hingegen der Privatsektor das Gebiet voranbringen. Aber die Investitionen sind noch hoch, und die Unternehmen bleiben zurückhaltend. Man sollte sich daran erinnern, dass der Erfolg des klassischen Internets nur dank staatlicher und unternehmerischer Kapitalanlagen möglich war. Seitdem wurden alle großen Telefongesellschaften privatisiert.

Zurück zu China ...

2016 brachte das Land im Rahmen der Mission »Quess« unter der Leitung von Jian-Wei Pan von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften den Satelliten Micius in die Umlaufbahn. Ein Jahr später diente der Satellit als Vertrauensknoten für eine verschlüsselte Kommunikation zwischen Wien, wo Pan promoviert hatte, und Peking.

Kann dieser Satellit einen Quantenschlüsselaustausch realisieren?

Ja. 2020 schickte Micius verschrankte Photonenpaare an zwei chinesische Stationen in Nanshan und Delingha, die 1120 Kilometer voneinander entfernt sind. Damit haben die Forscher den Entfernungsrekord für eine Quantenschlüsselverteilung ohne Vertrauensknoten gebrochen.

Könnte man sich auch vorstellen, den Satelliten als Quantenrepeater zu verwenden?

Dafür muss er die beiden Bodenstationen gleichzeitig sehen können. Micius befindet sich in einer niedrigen Umlaufbahn in weniger als 600 Kilometer Höhe; sein Horizont ist daher begrenzt. Für eine Kommunikation zwischen den USA und Europa bräuchte man einen Quantenspeicher, der ein Photon mehrere dutzend Minuten oder sogar eine Stunde lang festhalten kann! Außerdem ist die Technik derzeit noch weit davon entfernt, perfekt zu sein. Die Photonen werden großteils von der Atmosphäre absorbiert. Selbst im Experiment von 2020, als der Satellit sechs Millionen verschrankte Paare pro Sekunde produzierte, betrug der Informationsfluss nur 0,12 Bit pro Sekunde. Das Team von Pan arbeitet an der Entwicklung intensiverer Quellen, um diesen sehr geringen Durchsatz auszugleichen. Auch andere Länder widmen sich der Umsetzung von Quantenkommunikations-satelliten. Und selbst private Unternehmen planen solche Geräte, die als Knotenpunkte fungieren könnten.

Was fehlt dann noch, um ein Quanteninternet zu erzeugen?

Man darf den Softwareaspekt nicht vernachlässigen. Wir brauchen Protokolle, die in der Lage sind, Datenströme zu verwalten, sie an den richtigen Ort zu senden, Informationen von den physikalischen Schichten an Anwendungen zu übertragen und so weiter. Der Erfolg des klassischen Internets ist teilweise auf die Vereinheitlichung der Protokolle zurückzuführen. Aktuell hat jedes Labor oder Unternehmen seine eigenen Methoden der Quantenkommunikation entwickelt. Die Internationale Fernmeldeunion unter der Schirmherrschaft der Vereinten Nationen; die Europäische Kommission (mit einem Konsortium aus Unternehmen und Forschungsinstituten) und andere Organisationen beginnen, bei diesen Themen zusammenzuarbeiten, damit alle die gleiche Sprache sprechen.

Was kann man sich – neben einer sicheren Kommunikation – noch vom Quanteninternet erhoffen?

Das Quanteninternet ist eine unglaubliche technische Herausforderung. Für Physiker ist es ein faszinierendes Problem, das neue konzeptionelle Fragen aufwirft. Es weckt auch hohe Erwartungen an Quantencomputer. Durch die Teleportation von Informationen von einem zum anderen wird das Quanteninternet es ermöglichen, die Kombination solcher Maschinen voll auszunutzen, um ihre Leistung zu verzehnfachen.

Was ließe sich damit erreichen?

Zu den Versprechungen von Quantencomputern gehört, dass sie komplexe Moleküle simulieren werden, um neue Medikamente oder innovative Materialien zu entwickeln. Eine weitere große Herausforderung der Menschheit ist die Energiegewinnung. Bisher können wir das Sonnenlicht nicht so effizient zu nutzen wie die Natur. Vielleicht wird es durch Quantencomputer, die über das Quanteninternet verbunden sind, möglich sein, die Geheimnisse der Photosynthese zu entschlüsseln und damit die Wirkungsgrade von Sonnenkollektoren zu verbessern. Davon sind wir zwar noch weit entfernt, aber das Beispiel verdeutlicht, dass viel auf dem Spiel steht. ▲

Die Fragen stellte **Sean Bailly**, Redakteur bei »Pour la Science«.

QUELLEN

Gisin, N.: Der unbegreifliche Zufall: Nichtlokalität, Teleportation und weitere Seltsamkeiten der Quantenphysik. Springer Spektrum, 2014

Kimble, H.J.: The quantum internet. Nature 453, 2008

Wehner, S. et al.: Quantum internet: a vision for the road ahead. Science 362, 2018

Yin, J. et al.: Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120 kilometres. Nature 582, 2020

Spektrum LIVE

LESERREISEN 2022

In diesem Jahr bieten wir Ihnen drei ganz unterschiedliche Leserreisen mit **glurreisen** und **Wittmann Travel** an:

- Kunstreise durch **zeitgenössische Architektur in Oslo** im August
- **Polarlicht-Fotoseminar-Gruppenreise nach Island** Ende September
- Winterliche **Küstenreise in Norwegen** mit der Havila (November/Dezember)

Mit dem Code »Spektrum« bei Buchung der Reise **erhalten Spektrum-Abonnentinnen und -Abonnenten einen Rabatt** von fünf Prozent auf den Reisepreis (Zusatzausgaben ausgeschlossen).

Infos und Anmeldung:
Spektrum.de/live



TRÜGERISCHE IDYLLE Das

Néouvielle-Massiv in den französischen Pyrenäen zeichnet sich durch malerische Gewässer aus.

Neue Untersuchungen offenbaren jedoch, dass viele Bergseen verschmutzt sind.

DIRK SCHMIDELER

ÖKOLOGIE VERGIFTETE BERGSEEN

Viele Ökosysteme im Gebirge sind unter Druck. Klimawandel und chemische Verschmutzung setzen ihnen zu. Neue Daten belegen nun eine überraschend hohe Schadstoffbelastung der dortigen Gewässer.

Die Welt der Berge erscheint vielen als Paradies. Almen vor malerischer Kulisse, Sonnenstrahlen im Frühnebel, frische Luft, Alpenkühe auf sattem Grün, murmelnde Bäche und der Blick ins weite Land – all das kommt in den Sinn, wenn man ans Gebirge denkt. Und die idyllischen Bergseen mit ihrem eiskalten, glasklaren Wasser.

Leider hat das Paradies Risse bekommen. Der Klimawandel wirkt sich auf die Berge besonders stark aus, erhöht den Druck auf die dortigen Ökosysteme und treibt in den Höhenlagen einen Biodiversitätsverlust voran. Die Durchschnittstemperaturen steigen im Gebirge stärker als im Flachland, ebenso die Schwankungen der Niederschlagsmenge – beides trägt zum Schwinden der Gletscher bei und verändert den Wasserkreislauf. Messungen zeigen, dass auch die Plastikverschmutzung in den Höhenlagen angekommen ist. Meine Kollegen

um Steve Allen vom Centre national de la recherche scientifique (CNRS) haben das 2019 für ein Natura-2000-Schutzgebiet in der französischen Ariège nachgewiesen. Pro Tag und Quadratmeter gehen dort bis zu 365 Mikroplastikpartikel mit dem Regen beziehungsweise Schnee nieder. Selbst auf dem 2877 Meter hohen Gipfel des Pic-du-Midi de Bigorre findet sich im Schnitt ein Mikroplastikteilchen in vier Kubikmetern Luft.

Mein Team und ich untersuchen die Ökosysteme in den französischen Pyrenäen seit dem Jahr 2007. Primär möchten wir verstehen, warum Amphibien in einigen, aber nicht allen Populationen der Pyrenäen an der Pilzkrankheit Chytridiomykose sterben (siehe »Spektrum« September 2021, S. 56). Wie kommt es dazu, dass die Pilzkrankheit in manchen Bergseen wütet, um andere jedoch einen Bogen macht?

Im Jahr 2014 gewannen wir nach mehrjährigen Forschungsarbeiten eine

wichtige Erkenntnis dazu: In den Bergseen übt das so genannte Zooplankton (winzige Organismen, die keine Fotosynthese betreiben, etwa Ruderfußkrebse) eine Schutzfunktion aus. Es stellt eine biologische Barriere dar, die den Pilz *Batrachochytrium dendrobatidis*, den Verursacher der Chytridiomykose, an der Infektion und Verbreitung hindert. Das Zooplankton reagiert sehr sensibel auf Umweltveränderungen, besonders in Höhenlagen, wo ohnehin schon raue Bedingungen herrschen und nur relativ wenige angepasste Arten überdauern können.

Wir suchen immer wieder dieselben Bergseen auf und können deshalb deren zeitlichen Wandel beobachten. Manche Veränderungen sind offensichtlich, etwa der Amphibien- schwund, das zunehmende Algenwachstum und ausgeprägtere Schwankungen des Wasserspiegels. 2016 brachten wir unter meiner Lei-

tung das internationale Forschungsprojekt »People, Pollution and Pathogens« auf den Weg. Es intensiviert die einschlägigen Untersuchungen und erlaubt uns, die Entwicklungen in hoch gelegenen Gewässern genauer zu verfolgen. Das Projekt befasst sich mit dynamischen Veränderungen des Zooplanktons, mit dem Wandel in Mikrobenpopulationen und mit der chemischen Verschmutzung in Bergseen. Dabei profitieren wir von modernen massenspektrometrischen Verfahren, die etliche Substanzen bereits in einer Menge von wenigen Nanogramm (milliardstel Gramm) nachweisen.

Um die chemische Belastung der Gewässer zu analysieren, brachten wir so genannte Passivsammler in acht französischen Bergseen aus, die zwischen 1714 und 2400 Meter hoch liegen. Passivsammler sind spezielle Silikonplättchen, die lipophile (Fett liebende) Substanzen aufnehmen und anreichern. In der Umwelt zirkulieren derzeit rund 1500 Chemikalien aus menschlicher Produktion, die lipophile Eigenschaften besitzen – darunter Bestandteile von Pestiziden. Da wir jeden der untersuchten Bergseen dreimal jährlich aufsuchten, installierten wir unsere Passivsammler jeweils für die Dauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Besuchen. Jeder Sammler blieb sechs bis acht Wochen im Wasser, einmal während des Frühjahrs und einmal im Sommer. Das erlaubte uns, sowohl räumliche als auch zeitliche Unterschiede in der Verschmutzung zu erkennen.

In unserem Labor können wir derzeit rund 500 organische Chemikalien nachweisen, darunter persistente organische Schadstoffe, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, früher und aktuell eingesetzte Pestizide, Biozide und Moschusduftstoffe. Angesichts dieses breiten Nachweisspektrums hatten wir schon vorher erwartet, die eine oder andere Substanz in unseren Proben zu finden. Doch mit dem Ergebnis, das sich dann einstellte, hatten wir nicht gerechnet. Insgesamt 141 verschiedene Molekulsorten wiesen wir in den acht Bergseen nach – darunter Fungizide,

Herbizide, Insektizide, schwer abbaubare Pestizide, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, polychlorierte Biphenyle und weitere Chemikalien. Auf jeden einzelnen See entfielen zwischen 31 und 70 Substanzen, wobei sich kein klarer Unterschied zwischen Frühjahr und Sommer erkennen ließ.

Für Krebstiere chronisch giftig

Summiert man die Giftigkeit all dieser Stoffe in ihren jeweils nachgewiesenen Konzentrationen auf, dann ergibt sich: Das heutige Milieu in den Bergseen ist für Krebstiere, wichtige Vertreter des Zooplanktons, chronisch toxisch. In manchen Gewässern stellten wir sogar eine akute Toxizität fest, sprich eine klar schädigende zeitnahe Wirkung. Dazu passend zeigte sich der Bestand an Kleinkrebsen umso stärker vermindert, je höher die Belastung mit giftigen Chemikalien ausfiel. Auch die Artenvielfalt von Rädertierchen, einer zweiten bedeutenden Artengruppe des Zooplanktons, war mit zunehmender Toxizität immer weiter verringert.

KONTAMINATION Insektenmittel belasten Bergseen besonders stark. Menschen und Nutztiere tragen sie ins Wasser ein.

Die giftige Wirkung geht dabei vor allem von Herbiziden aus – Pflanzenbekämpfungsmitteln wie Atrazin oder Terbutylazin. Ihr Eintrag in Bergseen führt zu einer veränderten Zusammensetzung des Zooplanktons und damit der ökologischen Wechselwirkungen dort. Das könnte ein Grund dafür sein, warum in diesen Gewässern allmählich Algen die Oberhand gewinnen. Im Zuge solcher Veränderungen sinkt die erwähnte Barrierefunktion ab, die das Zooplankton für den Chytridiomykoseerreger darstellt. Mit anderen Worten, das Zooplankton kann wahrscheinlich seiner Funktion als »Amphibien-Beschützer« nicht mehr gerecht werden. Ähnliches könnte für weitere Krankheitserreger gelten, die für den Menschen und sein Weidevieh ein Risiko darstellen. Wir werden diesen Zusammenhängen weiter nachgehen.

Woher kommen die vielen Chemikalien in Bergseen? Offenbar verfrachten atmosphärische Transportprozesse sie dorthin. Im Flachland nutzte Stoffe gelangen per Verdunstung in die Luft und strömen mit den Winden ins Bergland. Dort kühlen die Luftmassen ab und es setzt Niederschlag ein, der die Substanzen mit sich führt. Regen- und Schmelzwasser spült sie in die Bergseen.

Wenn es um die Vergiftung von Gebirgsgewässern geht, stechen zwei



Verbindungen heraus: Diazinon und Permethrin. Das sind hochwirksame Insektizide, die schon im Nanogrammbereich eine hohe Toxizität entwickeln. Diazinon dient zum Bekämpfen von Schaben, Silberfischchen, Ameisen und Flöhen. Permethrin findet sich in diversen Abwehrmitteln gegen saugende Insekten – angewendet sowohl beim Menschen als auch bei Haus- und Nutztieren. Beide Stoffe kommen nachweislich in hochtoxischer Menge in den Bergseen vor. Wahrscheinlich tragen Mensch und Vieh sie ins Wasser ein.

Radikales Umdenken tut not. Der Verschmutzungsgrad der Bergseen ist zutiefst beunruhigend; zu einer Selbstreinigung dieser Gewässer kann

es nur kommen, wenn keine neuen Schadstoffe in diese sensiblen Ökosysteme gelangen. Pflanzliche Alternativen zu künstlichen Insektenabwehrmitteln gibt es, und auch in der Landwirtschaft ist es dringend geboten, den massenhaften Einsatz von Herbiziden und Pestiziden einzuschränken. Denn die Folgen unserer Umweltverschmutzung betreffen selbst Regionen in tausenden Metern Höhe. ▶

Dirk Schmeller ist Professor für Ökologie an der Forschungseinrichtung ENSAT (École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse) in Toulouse, Frankreich.

QUELLEN

Allen, S. et al.: Atmospheric transport and deposition of microplastics in a

remote mountain catchment. *Nature Geoscience* 12, 2019

Allen, S. et al.: Evidence of free tropospheric and long-range transport of microplastic at Pic du Midi Observatory. *Nature Communications* 12, 2021

Machate, O. et al.: Complex chemical cocktail, containing insecticides diazinon and permethrin, drives acute toxicity to crustaceans in mountain lakes. *Science of the Total Environment* 828, 2022

WEBLINK

youtube.com/playlist?list=PLiQ6EUpPNdaE6-phbKyOr6eGhiK4NMbQq

»Berge – ein fragiler Quell des Lebens«
Video-Serie des Autors auf Youtube

ANTIMATERIE ÜBERRASCHUNG BEIM TEMPERATURNULLPUNKT

Aus Materie und Antimaterie lassen sich exotische Atome zusammensetzen. In einer extrem kalten Umgebung aus flüssigem Helium offenbaren sich ihre Spektrallinien in völlig unerwarteter Präzision.

Heutzutage lassen sich allerlei skurrile Experimente durchführen. Beispielsweise ein exotisches Atom konstruieren, das sowohl aus Materie als auch aus Antimaterie besteht. Wenn es sich in flüssigem Helium befindet, verhält es sich seltsam: Bei normalen Teilchen bringen Stöße mit der Umgebung bestimmte charakteristische Eigenschaften – die Spektrallinien – durcheinander; das hybride Atom lässt sich davon jedoch unter einer gewissen Temperatur überraschend wenig beeinflussen. Das Team um Gruppenleiter Masaki Hori vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München hat Jahre damit verbracht, dieses von der Doktorandin Anna Sótér konzipierte Experiment zu wiederholen, die Daten zu überprüfen und darüber zu rätseln, was hier vor sich gehen könnte. Sótér, inzwischen Assistenzprofessorin an der ETH Zürich, veröffentlichte schließlich die Entdeckung gemeinsam mit ihren Kollegen im März 2022.

Der Atomphysiker Mikhail Lemeshko am Institute of Science and Technology Austria in Klosterneuburg bei Wien, selbst nicht an den Experimenten beteiligt, hält die Resultate für »sehr aufregend«. Er geht davon aus, dass sich damit neue Wege auftun, schwer fassbare Formen von Materie einzufangen und zu untersuchen.

Will man etwas über die Eigenschaften von Atomen herausfinden, kann man sie mit einem Laser anregen und schauen, was passiert: Das ist die so genannte Spektroskopie. Ein Laserstrahl mit der richtigen Frequenz kann zum Beispiel ein Elektron aus der Hülle des Atoms kurzzeitig auf ein höheres Energieniveau bringen. Wenn es in seinen vorherigen Zustand zurückkehrt, sendet das Elektron Licht einer bestimmten Wellenlänge aus. »Das ist sozusagen die Farbe des Atoms«, erläutert Hori, der sich auf Spektroskopie mit Antimaterie spezialisiert hat.

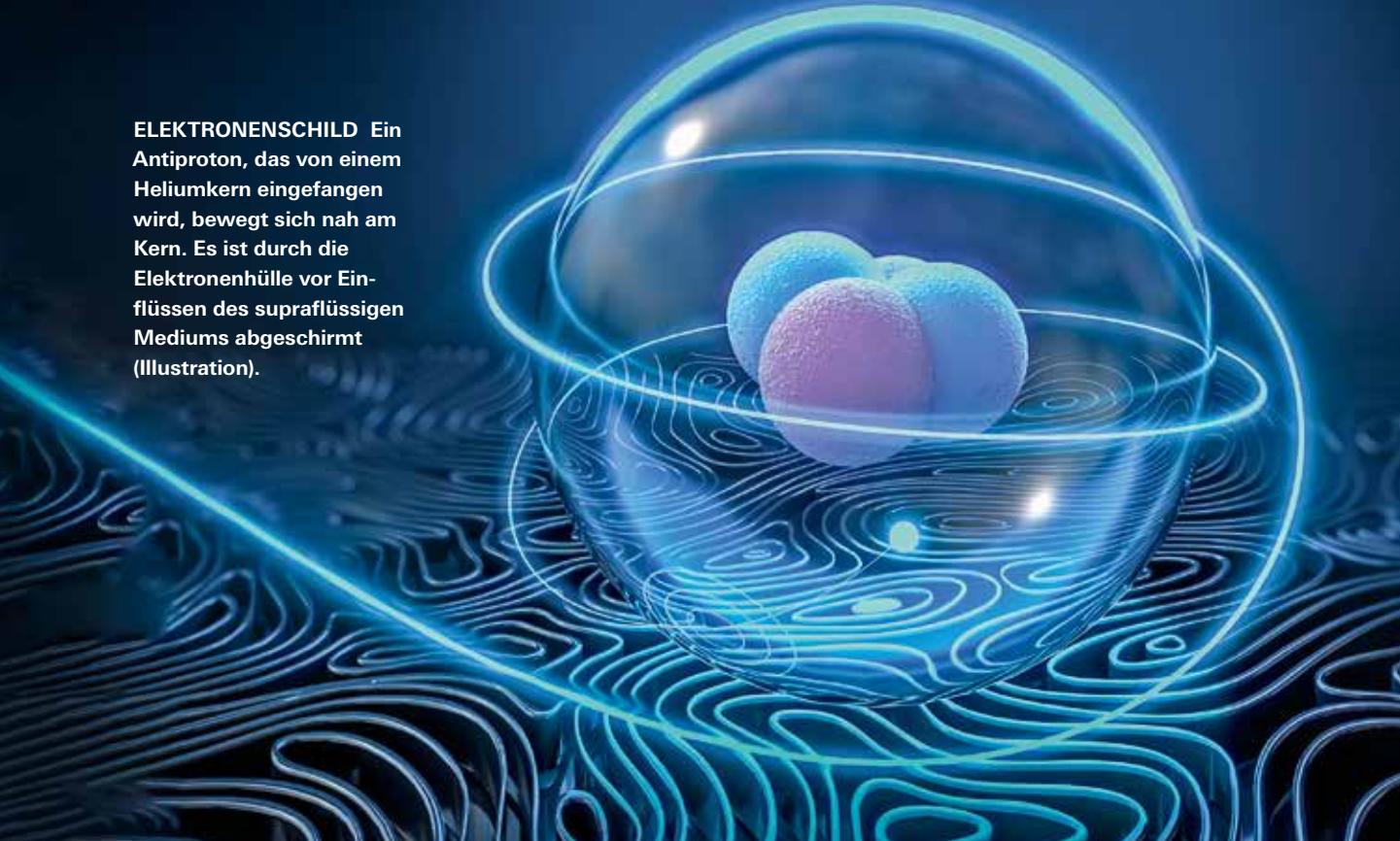
Unter idealen Bedingungen würde jedes einzelne Atom in einer Probe mit

den gleichen Farben leuchten. Solche Spektrallinien, scharf begrenzte Ausschnitte aus dem kontinuierlichen Spektrum, verraten etwas über die speziellen Eigenschaften eines Stoffs. Sie lassen sich auf Naturkonstanten zurückführen, etwa auf die Ladung des Elektrons oder darauf, wie viel leichter dieses ist als die Protonen im Kern. Zumindest theoretisch funktioniert das mit äußerster Präzision.

Aber unsere Welt ist nicht makellos. In der Realität rasen Atome umher und stoßen mit ihren Nachbarn zusammen, was die Energieniveaus durcheinanderbringt. Bei Anregung durch einen Laser reagiert infolgedessen jedes Atom leicht unterschiedlich. Insgesamt werden so die eigentlich klar umrissenen Farben über einen weiten Bereich verschmiert.

Spektroskopiefachleute wie Hori haben ihre berufliche Laufbahn der Suche nach Maßnahmen verschrieben, solchen Verbreiterungen der Spektrallinien entgegenzuwirken. Beispielswei-

ELEKTRONENSCHILD Ein Antiproton, das von einem Heliumkern eingefangen wird, bewegt sich nah am Kern. Es ist durch die Elektronenhülle vor Einflüssen des supraflüssigen Mediums abgeschirmt (Illustration).



CHRISTOPH HOMMANN, MOST CLUSTER

se kann man verdünnte Gase verwenden, in denen es seltener zu Zusammenstößen der Atome kommt. Deswegen erschien ein Versuch, den Anna Sótér 2013 interessehalber durchführen wollte, zunächst kontraintuitiv.

Neugier führte zu seltsamen Daten
Zu jener Zeit beschäftigte sich Sótér in einem Labor des Forschungszentrums CERN bei Genf mit Antimaterie. Die Arbeitsgruppe konnte am dortigen ASACUSA-Experiment hybride Atome aus Materie und Antimaterie zusammensetzen, indem sie Antiprotonen in flüssiges Helium schoss. Antiprotonen sind die negativ geladenen Gegenstücke der Protonen. Gelegentlich kann eines den Platz eines Elektrons in der Hülle eines Atomkerns einnehmen. So entsteht eine kleine Menge von so genannten antiprotonischen Heliumatomen. Das Projekt war als Machbarkeitsstudie zur Vorbereitung auf Experimente mit noch exotischeren Hybridatomen angelegt. Es sollte zeigen, ob Spektroskopie in solch einem Heliumbad überhaupt funktioniert.

Sótérs Neugier galt der Frage, wie sich die Hybridatome bei unterschied-

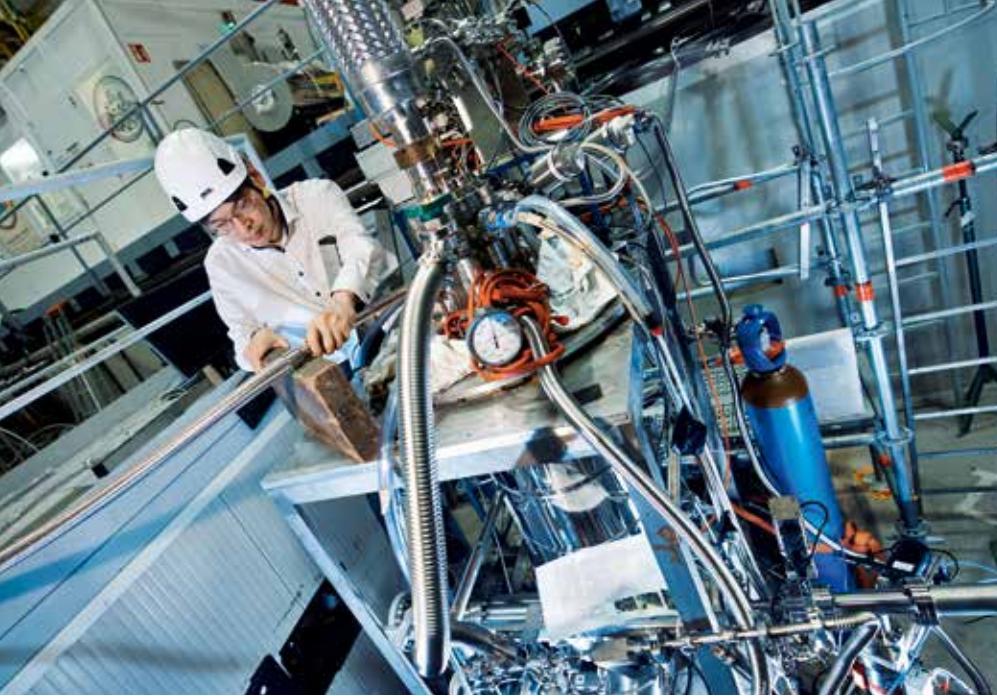
lichen Temperaturen des umgebenden Heliums verhalten würden. Sie überredete ihr Team dazu, die kostbare Antimaterie dafür aufzuwenden, die Messungen in immer kälteren Heliumbädern zu wiederholen. »Es war eine relativ willkürliche Idee«, erinnert sich Sótér. »Die anderen waren nicht gerade davon überzeugt, dass es sich lohnen würde.«

Eigentlich sollten sich die Spektrallinien unter dem Einfluss der mit der Abkühlung immer dichteren Flüssigkeit enorm verbreitern. Bei den Hybridatomen war aber das Gegenteil zu beobachten. Als das Team die Temperaturen des Heliumbads senkte, wurde die Linie schmäler und schmäler. Unterhalb von etwa 2,2 Kelvin wird Helium zu einer so genannten Suprafluidität, die keine innere Reibung mehr aufweist. In diesem suprafluiden Zustand war bei den angeregten Hybridatomen eine Resonanz zu sehen, das heißt eine Aussendung von Licht einer bestimmten Wellenlänge nach Anregung durch den Laser, die fast so scharf begrenzt war wie in gasförmigem Helium. Das bedeutet, obwohl sich die Materie-Antimaterie-Atome in einer viel dichteren Umge-

bung befanden und von Letzterer entsprechend stärker hätten beeinflusst werden sollen, verhielten sie sich, als würden sie davon kaum etwas spüren.

Sótér und Hori konnten sich keinen Reim darauf machen und suchten nach denkbaren Fehlern. »Wir diskutierten noch viele Jahre lang darüber«, resümiert Hori. »Es fiel mir schwer zu verstehen, was hinter dem Effekt stecken könnte.« Mit der Zeit kamen die beiden zu dem Schluss, dass bei dem Versuch nichts schiefgelaufen war. Offenbar finden die von Gasen gewohnten Kollisionen in suprafluidem Helium nicht statt, und so bleiben die Spektrallinien eng begrenzt, statt sich zu verbreitern. Nur die Ursache dafür blieb unklar. Theoretisch zeichnen sich zwei plausible Gründe ab.

Der erste Erklärungsversuch dreht sich um die Beschaffenheit der flüssigen Umgebung. Die Linien im Spektrum wurden plötzlich scharf, als das Helium einen suprafluiden Zustand erreichte. Bei dem quantenmechanischen Phänomen verlieren einzelne Atome des Mediums gewissermaßen ihre Identität. Statt sich aneinander zu reiben, gehen alle in einem Kollektiv



MAXIMILIEN BRICE/CERN

ASACUSA-EXPERIMENT Gruppenleiter Masaki Hori arbeitet an einem Instrument am Forschungszentrum CERN, bei dem Antiprotonen aus einem Speicherring des Beschleunigers abgebremst und mit normaler Materie zusammengebracht werden.

ohne Zähigkeit auf. Da Kollisionen ganz allgemein unterdrückt werden, erfahren auch einzelne fremde Atome in dem Medium keinen Widerstand, der ihre Spektrallinien verbreitern würde. In manchen Fällen könnten diese sogar etwas schärfer erscheinen als im Gas, da die Atome regelrecht abgeschirmt werden. »Suprafluides Helium ist sozusagen das weichste bekannte Material, in das man Atome und Moleküle betten kann«, betont Lemeshko.

Elektronenhülle als Schutzhülle für das Antiteilchen

Doch sogar eine etwaige Isolierung in der supraflüssigen Umgebung kann das Verhalten der Hybridatome noch nicht vollumfänglich erklären. Vielmehr dürfte ein weiterer Anteil auf die ungewöhnliche Struktur der Atome selbst zurückgehen. Ihr Gehalt an Antimaterie ist womöglich die zweite Ursache für das seltsame spektrale Verhalten.

In einem normalen Atom kann sich ein äußeres Elektron weit von dem bindenden Kern entfernen, insbesondere wenn es durch einen Laser angeregt wird. Bei solch einem großen Abstand gelangt das Elektron leicht in den Wirkungsbereich benachbarter Objekte. Das kann die für das Atom

typischen Energieniveaus verändern und so die Spektrallinien verbreitern. Als Sótér und ihre Kollegen ein leichtes Elektron gegen ein schweres Antiproton austauschten, änderten sie die Dynamik des Atoms drastisch. Das Antiproton ist wegen seiner Masse träge und bleibt wegen seiner negativen Ladung in der Nähe des Kerns, wo es vom zweiten Elektron abgeschirmt wird – »wie von einem Schutzhügel«, vergleicht Hori.

Bisher sind diese Erklärungen aber nur grobe Hypothesen. So bleibt vorerst rätselhaft, warum sich die spektrale Verbreiterung bei dichterem Gas nach dem Übergang zum suprafluiden Zustand umkehrt und die Linien wieder dünner werden. Es ist nicht möglich, die beobachteten Veränderungen konkret zu berechnen. »Ohne eine brauchbare Vorhersage hat man keine Theorie, sondern betreibt nur Schaumschlügerei«, mahnt Hori.

Unterdessen legt die Entdeckung bereits Anwendungen in der Spektroskopie nahe. Die dort üblichen Messungen mit Gasen bei niedrigem Druck etwa sind manchmal nur unter großem Aufwand durchführbar. Das wilde Herumschwirren im Gas, das die Linien verbreitert, lässt sich beispielsweise reduzieren, indem Laser und elektromagnetische Felder die Atome

abbremsen. Da es nun so aussieht, als würde eine flüssige Umgebung nicht zwangsläufig die Spektrallinien verschmieren, erscheint es als praktikable Alternative, die Atome stattdessen in ein Suprafluid zu bringen und sie dort relativ ruhig zu halten.

Antiprotonen sind nur eine Art von exotischen Teilchen, die um einen Heliumkern platziert werden können. Horis Gruppe hat die Technik bereits zur Herstellung und Untersuchung von »pionischem« Helium eingesetzt, bei dem ein extrem kurzebiges, so genanntes Pion ein Elektron ersetzt. Sótér und Hori haben gemeinsam mit Kollegen in suprafluidem Helium die ersten spektroskopischen Messungen an pionischem Helium durchgeführt und die Ergebnisse im Mai 2020 publiziert; wegen der komplizierteren experimentellen Bedingungen lieferte das eine recht breite Resonanz und vorerst nur einen Beleg dafür, dass das Prinzip auch bei diesem System grundsätzlich funktioniert. Hori möchte mit derselben Methode beispielsweise das Kaon einbinden und untersuchen, einen seltenen Verwandten des Pions. Er sagt: »Wir haben damit jetzt technische Möglichkeiten, die uns zuvor nicht zur Verfügung standen.« Derlei Experimente könnten helfen, fundamentalen Zusammenhängen mit noch nie dagewesener Präzision nachzuspüren.

Charlie Wood ist Physiker und Wissenschaftsjournalist in New York.

QUELLEN

Hori, M. et al.: Laser spectroscopy of pionic helium atoms. *Nature* 581, 2020

Sótér, A. et al.: High-resolution laser resonances of antiprotonic helium in superfluid ^4He . *Nature* 603, 2022

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »An Antimatter Experiment Shows Surprises Near Absolute Zero« 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

AUSBRUCH AUF TONGA EIN VULKAN UND VIELE RÄTSEL

Der Hunga Tonga-Hunga Ha'apai schickte Wellen verschiedener Art um den Globus. Auch die Vulkanologie hat er erschüttert: Die Eruption widersprach allen ihren Erwartungen.

► Nur elf Stunden dauerte der Ausbruch des Hunga Tonga-Hunga Ha'apai am 15. Januar 2022, aber die Folgen für den Inselstaat Tonga waren verheerend. Herauszufinden, was genau während der katastrophalen Explosion geschah – und vor allem, was das für künftige Risiken bedeutet –, wird die Forschung noch über Jahre beschäftigen.

Der Vulkan schickte eine Aschewolke in die obere Atmosphäre und löste einen Tsunami aus, der viele Häuser auf den nahe gelegenen Inseln zerstörte. Die außergewöhnliche Kraft der Explosion stellt die bisherigen Erkenntnisse über die Physik von Eruptionen in Frage. Warum erreichte die Aschewolke enorme Höhen, war aber weit kleiner, als man bei einem Ausbruch dieser Größenordnung erwarten würde? Auch die Stoßwellen, die sich durch die Atmosphäre und die Ozeane

ausbreiteten, sind mit nichts vergleichbar, was die moderne Wissenschaft bisher gesehen hat. Die dominante von ihnen umrundete die Erde innerhalb von sechs Tagen gar viermal, wie ein internationales Forschungsteam berichtete.

Die Gefahren, die von den vielen untermeerischen Vulkanen im Pazifik ausgehen, müssen unter diesen Umständen neu bewertet werden. Besonders gesichert sei dieses Wissen bis jetzt ohnehin nicht gewesen, sagt der Vulkanologe Nico Fournier von GNS Science im neuseeländischen Taupo. Der jüngste Ausbruch habe »im Grunde das Heftplaster abgerissen«, das die Wissenschaft auf ihre mangelhaften Modelle geklebt hatte.

Der größte Teil des Hunga Tonga-Hunga Ha'apai liegt unter Wasser. Er erhebt sich mehr als 2000 Meter über dem Meeresboden und ist Teil des Tonga-Kermadec-Vulkanbogens. Diese Kette von Vulkanen, größtenteils unter der Meeresoberfläche, befindet sich über einer ausgedehnten geologischen Kollisionszone: Dort taucht der westli-

che Rand der pazifischen Platte unter die indoaustralische Platte. Der Rand der pazifischen Platte erwärmt sich, während er in die Tiefe sinkt, geschmolzenes Gestein steigt auf und speist die Vulkane des Tonga-Kermadec-Bogens.

Die geologische Forschung hat gezeigt, dass am Hunga Tonga-Hunga Ha'apai zirka einmal pro Jahrtausend eine größere Eruption aufgetreten ist; gewaltige Ausbrüche ereigneten sich etwa in den Jahren 200 und 1100. Im letzten Jahrhundert gab es 1937 und 1988 schwächere Eruptionen. Damals ragte die Spitze des Vulkans in Form von zwei kleinen Inseln, Hunga Tonga und Hunga Ha'apai, aus den Wellen heraus.

Zwei Inseln werden eine

Im Jahr 2009 begann der Vulkan bei einem Ausbruch auf Hunga Ha'apai Asche und Dampf zu spucken. Durch eine weitere Eruption im Dezember 2014 und Januar 2015 entstand neues Land, das aus den beiden Inseln eine einzige machte. Mehrere Forschungsteams besuchten das vereinigte Eiland kurze Zeit später und sammelten Proben von Vulkanasche und -gestein.

Geochemischen Analysen dieses Materials nach zu urteilen war bei den Explosions von 2009 und 2014/2015 geschmolzenes Gestein beteiligt, das nicht erst kürzlich aus den großen Tiefen des Erdmantels aufgestiegen war. Vielmehr hatte es einige Zeit in einer geologischen Zwischenstation verbracht: einer Magmakammer, die sich fünf bis acht Kilometer tief in der Erdkruste befindet. Darin hat es vor dem Ausbruch charakteristische chemische Veränderungen durchlaufen – wie Wein, der in einem Fass reift.

Das Magma vom Januar 2022 aber ist anders. Shane Cronin, Vulkanologe

BEISPIELLOS Bis in die Stratosphäre stieg die riesige Wolke aus Asche und Wasserdampf auf.





VERSCHWUNDEN – die Inseln Hunga Tonga und Hunga Ha'apai vor (links) und nach der Explosion (rechts).

an der University of Auckland in Neuseeland, und seine Kollegen haben Asche analysiert, die Katastrophenhelfer auf Tongas größter Insel aufgesammelt haben. Cronin zufolge ist das frische Magma auffällig schnell aufgestiegen – zu rasch, um die typischen Veränderungen in der Magmakammer zu durchlaufen.

Der Geologe Taaniela Kula und seine Kollegen vom Geologischen Dienst von Tonga in Nuku'alofa sammelten Ascheproben von Inseln in ganz Tonga, die Cronin und andere Fachleute jetzt analysieren. Auch die Höhe der abgelagerten Schichten und ihre Verteilung geben Aufschluss über den Ablauf der Eruption.

Gemessen an deren Stärke stieß der Vulkan vergleichsweise wenig Asche aus. Grund ist möglicherweise seine Position: unter Wasser, aber nur in einer eher geringen Tiefe. Hätte der Vulkan weiter unten gelegen, so hätte der Druck des Wassers darüber ein Durchbrechen der Explosion an die Wasseroberfläche womöglich verhindert. Bei einem Schlot nahe an der Meeresoberfläche wiederum wäre weniger Wasser schlagartig in Dampf verwandelt worden, und die Eruption hätte eine deutlich geringere Explosionskraft besessen.

Vulkanausbrüche in tiefen Gewässern machen sich nur selten über dem Meer als große Explosionen bemerkbar. Denn der Druck des aufliegenden Wassers verhindert, dass sich Gasbla-

sen explosiv aufblähen. Der Vulkan-Schlott, der am 15. Januar bei Hunga Tonga-Hunga Ha'apai ausbrach, lag jedoch nur einige 10 bis 250 Meter tief. Dort ist der Druck des Wassers nicht hoch genug, um die Kraft der Explosion komplett zu unterdrücken, aber es ist bereits eine riesige Menge Wasser vorhanden, auf die das ausbrechende Magma trifft.

Die Hitze verwandelt das Wasser blitzschnell in Dampf, der sich daraufhin enorm ausdehnt. Anders gesagt: Die thermische Energie des Magmas wird sehr effizient in die kinetische Energie einer Eruption umgewandelt, wie Michael Manga, Geowissenschaftler an der University of California, Berkeley es formuliert: »Einige der stärksten Eruptionen wurden durch Wasser ausgelöst.« Die Eruptionswolke des Vulkans bestand demnach zu einem guten Teil aus Wasserdampf, was die vergleichsweise geringe Aschemenge erklärt. Ebenfalls wichtig ist, wie viel vulkanisches Gas dem Magma beigemischt ist, bevor es ausbricht. Ein gasreicher Magmaaufstieg könnte die Eruption vom 15. Januar begünstigt haben, indem er eine große Anzahl von Blasen für die Explosion lieferte, sagt Raymond Cas, Vulkanologe und emeritierter Professor an der Monash University in Melbourne.

Die Eruption des Hunga Tonga-Hunga Ha'apai ist laut Cas insofern besonders, als dabei mehrere ungewöhnliche Gegebenheiten zusammentrafen. Vulkanologen kennen andere Beispiele für Ausbrüche, bei denen Wasser eine Schlüsselrolle spielte, weil sie unter der Meeresoberfläche oder unter

Schnee und Eis stattfanden. Auch extrem hohe Eruptionssäulen habe man schon früher gesehen. Doch jetzt beobachteten Wissenschaftler erstmals beide Phänomene zugleich. Der Ausbruch könnte womöglich gar als Prototyp für eine neue Art von Eruption dienen, vermutet der Forscher.

Bei untermeerischen Ausbrüchen gebe es »relativ wenige Fälle, in denen wir große Eruptionsfahnen sehen«, sagt Kristen Fauria, Vulkanologin an der Vanderbilt University in Nashville, Tennessee. Der gewaltige Tiefseeausbruch des Havre-Vulkans nördlich von Neuseeland im Jahr 2012 beispielsweise erzeugte hauptsächlich einen riesigen Bimssteinteppich auf dem Ozean. Diese Explosion ereignete sich mehr als 900 Meter unter der Wasseroberfläche.

Keine direkte Wirkung aufs Klima

Die Eruptionssäule des Hunga Tonga-Hunga Ha'apai stieg jedoch mindestens 30 Kilometer weit auf, also weit in die obere Atmosphäre, die Stratosphäre – Teile der Wolke wurden laut Berechnungen der NASA kurzfristig sogar 58 Kilometer weit hinaufgeschleudert, bis in die Mesosphäre. Forscherinnen und Forscher rätseln noch, welche langfristigen Auswirkungen die Verteilung in solche Höhe haben könnte. Dank hochauflösender Satellitenbilder können sie verfolgen, wie Asche, Gas und bestimmte chemische Stoffe durch die Atmosphäre wandern – und zwar viel detaillierter als 1991 beim Ausbruch des Vulkans Pinatubo auf den Philippinen. »So etwas haben wir noch nie gesehen«, sagt Anja Schmidt, Vulkanologin am

Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen.

Der Vulkan in Tonga hat vermutlich etwas weniger als eine halbe Million Tonnen Schwefeldioxid ausgestoßen. Das reicht nicht aus, um das globale Klima zu verändern, wie es bei Ausbrüchen anderer Vulkane der Fall war: Als der Pinatubo fast 20 Millionen Tonnen der Schwefelverbindung in die Luft blies, kühlte das den Planeten vorübergehend um etwa 0,5 Grad Celsius ab. Denn in der Stratosphäre bilden sich aus der Verbindung Sulfatpartikel, die einen Teil der Sonnenstrahlung zurück ins All reflektieren.

Auch wenn die geschätzte Menge an Schwefeldioxid bei der aktuellen Eruption relativ gering sei, werde man trotzdem nach Anzeichen für Auswirkungen auf das Klima suchen, sagt Schmidt. Möglich wären etwa Effekte des vulkanischen Materials auf das Ozon in der Stratosphäre. Auch könnten atmosphärische Wellen, die der Ausbruch ausgelöst hat, überregionale Wettermuster beeinflussen.

Erste Erkenntnisse dazu liefern die Ballons, die Forscherteams in die Eruptionssäule geschickt haben: Eine Gruppe der US-amerikanischen National Oceanic and Atmospheric Administration hat noch in 28 Kilometern Höhe vulkanische Partikel nachgewiesen, als die Wolke über die Insel La Réunion im indischen Ozean zog, erzählt Elizabeth Asher, Atmosphärenwissenschaftlerin

am Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences in Boulder, Colorado. Weil sich die Partikel in solch großer Höhe befinden, werden die Auswirkungen auf die Atmosphäre ihrer Ansicht nach länger anhalten als bei schwächeren Eruptionen.

Bemerkenswert finden Fachleute außerdem, wie der Vulkan eine Vielzahl unterschiedlicher Wellen über den Globus schickte. Alan Robock, Klimawissenschaftler an der Rutgers University in New Brunswick, New Jersey, fühlt sich gar an den Krakatau in Indonesien erinnert, dessen Explosion im Jahr 1883 noch in mehreren tausend Kilometern Entfernung zu hören war. Die Eruption im Januar 2022 löste Druck- und Schwerkraftwellen in der Atmosphäre und Tsunamis rund um den Pazifik aus, selbst in weit entfernten Meeresbecken. GPS-Satelliten entdeckten sogar Störungen in der Ionosphäre, der Atmosphärenschicht oberhalb der Stratosphäre, die in 80 bis 90 Kilometern Höhe beginnt.

Es wird schwierig, genügend Daten zu sammeln, um das Puzzle zu vervollständigen. In Tonga gibt es derzeit beispielsweise keine aktiven Seismometer, um die Beben, die im Nachgang der Eruption im Umfeld des Vulkans stattfanden und mehrere Tsunamis auslösten, im Detail zu verfolgen. Nach allem, was bisher bekannt ist, könnten sie durch frisches Magma verursacht worden sein, das in die Kruste auf-

steigt. Dabei füllt sich das Reservoir, das durch den großen Ausbruch geleert wurde, wie Cronin erläutert.

Priorität hat auch die Untersuchung des Meeresbodens. Wo hat er sich verändert? Wo wurden Teile abgesprengt? Nach Radarmessungen aus dem Erdorbit zu urteilen, so Cronin, hat sich der obere Teil des Vulkans um mindestens zehn Meter gesenkt.

Generell habe der Ausbruch die Vulkanologen dazu veranlasst, die Gefahren untermeerischer Vulkane neu zu überdenken, sagt Schmidt: »Er erinnert uns eindringlich daran, dass diese Art von Vulkanen existiert, dass sie gefährlich sind und noch nicht ausreichend erforscht.« ▶

Die Wissenschaftsjournalistin **Alexandra Witze** schreibt unter anderem für »Nature«.

QUELLEN

Brenna, M. et al.: Post-caldera volcanism reveals shallow priming of an intra-ocean arc andesitic caldera: Hunga volcano, Tonga, SW Pacific. *Lithos* 412–413, 2022

Matoza, R.S. et al.: Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, 2022, doi: 10.1126/science.abo7063

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 602, S. 376–378, 2022

ANZEIGE



**Bergbau und Umwelt
im deutsch-deutschen
Vergleich**

GRAS DRÜBER ...

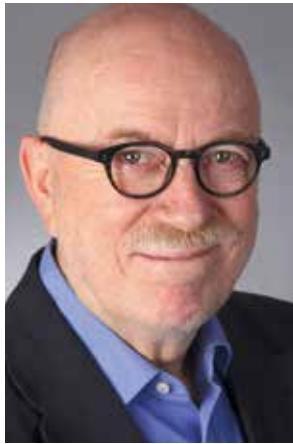
bergbaumuseum.de/gras-drueber

11.06.2022 – 15.01.2023

Gebührenfrei 199,-



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



SPRINGERS EINWÜRFE BRAINSTORMING PER VIDEO

Sind wir im Rahmen einer virtuellen Konferenz genauso kreativ wie im persönlichen Gespräch?

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

► spektrum.de/artikel/2021572

Meine Bekannten und ich waren seit vielen Jahren gewohnt, uns jeden Samstagmittag in der Kneipe »Zum Insulaner« zu treffen. Da sah man uns heftig gestikulieren, und gelegentlich stritten wir wie die sprichwörtlichen Kesselflicker. Es ging um alles Mögliche, von privatem Tratsch über Bücher und Filme bis zur kleinen oder großen Politik.

Die Pandemie zwang uns, die rituellen Begegnungen ins Virtuelle zu verlagern: Wir verabredeten uns zu samstäglichen Videokonferenzen. Das sei aber gar nicht dasselbe, fanden wir bald. Einige sprangen ab, manchen verging die gute Laune. Öfters beschwerte sich jemand, er käme nie zu Wort, weil ein anderer dauernd rede. Mit knapper Not retteten wir unseren Kontakt über die Lockdown-Phasen und freuten uns auf ein echtes Wiedersehen.

Ist dieses Ungenügen nur der Macht der Gewohnheit geschuldet, oder leidet die virtuelle Kommunikation tatsächlich an gewissen Defiziten? Die Frage betrifft nicht nur private Begegnungen, denn mit dem Ausklingen der Pandemie wird sich ein erheblicher Teil der Arbeitswelt permanent ins Homeoffice verlagert haben.

Mit einem Aufwand haben die Marketingforscherin Melanie S. Brucks von der Columbia University in New York und ihr Kollege Jonathan Levav von der Stanford University untersucht, ob die Kreativität leidet, wenn sich Personen über Bildschirme austauschen (*Nature* 605, S. 108–112, 2022). Dabei sind zwei Komponenten von Ideenreichtum zu unterscheiden: einerseits das Hervorbringen überraschender Gedanken, andererseits deren kritische Bewertung. Zu einem erfolgreichen Brainstorming gehört das Sprudeln möglichst vieler Vorschläge, von denen am Ende nur die besten übrig bleiben.

Zunächst verglichen Brucks und Levav reale und virtuelle Interaktionen in Laborversuchen. Aus 602 Versuchspersonen wurden zufällige Paare gebildet, die fünf Minuten lang originelle Verwendungen eines Pro-

dukts aushecken sollten; dann bekamen sie eine Minute Zeit, die cleverste Idee auszuwählen. Wie sich herausstellte, lieferten die per Bildschirm verbundenen Paare deutlich weniger kreative Vorschläge als diejenigen, die einander persönlich im selben Raum gegenüberstanden. Hingegen machte technisch vermittelte versus tatsächliche Kooperation beim Selektieren der jeweils besten Idee wenig Unterschied.

Dieser Befund erhärtete sich in einem groß angelegten Feldversuch: Knapp 1500 Ingenieure aus fünf Ländern in Europa, dem Nahen Osten und Südasien entwickelten je eine Stunde lang paarweise Produktideen und wählten eine davon als innovativen Vorschlag für ihre Firma aus. Wiederum waren die direkt Kommunizierenden kreativer als die virtuell Verbundenen; indes waren Letztere sogar effektiver bei der Auswahl der besten Ideen.

Wie lässt sich das erklären? Die Forscher zeichneten Blickbewegungen auf und fanden, dass die realen Paare öfter in dem gemeinsamen Raum umhersahen und sich offenbar von darin vorhandenen Objekten inspirieren ließen, während die telemedialen Teilnehmer bloß den Bildschirm fixierten. Diese Fokussierung auf den Partner wirkte wiederum bei der nachträglichen Bewertung kreativer Ideen eher vorteilhaft.

Vermutlich schneidet die virtuelle Kommunikation gegenüber der realen noch viel schlechter ab, wenn man statt Paaren größere Teams untersucht. Da sich bei unserer Video-Samstagsgruppe bis zu fünf Personen den Bildschirm teilen, fällt es einem schwer, sich zu Wort zu melden. Köpfe ohne Körper verfügen kaum über Gesten, die Ungeduld anzeigen oder Unzufriedenheit mit dem Gesprächsverlauf. Statt Ideen auszutauschen, beginnen die Teilnehmer einander Vorwürfe zu machen. Wenn wir persönlich zusammensitzen, gibt ein Wort leicht das andere, und oft sind wir vom Ergebnis angenehm überrascht.

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

OZON MACHT LEBENSMITTEL HALTBAR

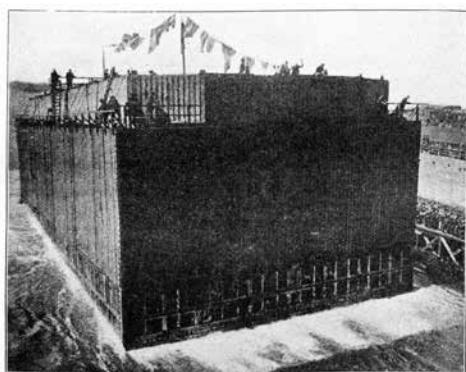
»Eine neue Art, Lebensmittel zu konservieren, namentlich Fische und Fleisch, besteht in der Ozonisierung der Aufbewahrungsräume. Das Ozon wird gewonnen aus der Luft mit Hilfe des elektrischen Stromes. Die Vorrichtung ist sehr einfach: man braucht lediglich einen elektrischen Transformator, Ozonatoren, einen Insufflator und Ventilatoren. Die Einrichtung wirkt automatisch, 2-3 Stunden täglich genügen. Das Ozon wirkt in keiner Weise schädlich auf die Nahrungsmittel. Fleisch erhält sich, wie wenn es in Wachs oder Oel getaucht wäre.« *Die Umschau 28, S. 445*

1922

GROSSPROJEKT IM BRÜCKENBAU

»Für den Bau der neuen Brücke über den Delawarefluß ist ein Senkkasten angefertigt worden, wie er bis jetzt noch nicht nötig war. Er ist allerdings auch für den Bau eines gewaltigen Pfeilers einer gewaltig großen Brücke bestimmt, die Camden mit Philadelphia verbinden soll. Der Senkkasten wiegt 1600 Tonnen, hat eine Höhe von 65 Fuß und einen Boden, der 70 Fuß mal 143 Fuß mißt. Der Kasten ist aus Stahl [und] Hartholz. Im Grunde des Kastens

befindet sich ein Arbeitsraum. [Von seinem] Dach erheben sich zehn Schächte. Durch sie wird der ausgebaggerte Boden heraufbefördert.« *Technische Monatshefte 7, S. 166*



Der gewaltige Senkkasten im Delawarefluss.

EIN SEE WIE TOMATENSOSSE

»Etwas unterhalb der Kuppe des Bilsteins liegt auf dem Wege nach Witzenhausen a. d. Werra ein kleiner See, der dadurch entstanden ist, daß ein Basaltsteinbruch durch Quellwasser ersoffen ist. Dieser See überrascht durch seine merkwürdig rote Farbe, welche von den Felswänden absticht, und deren Farbenton am besten mit demjenigen einer Tomatensauce verglichen werden kann. Vorläufige Lotungen führten zu Tiefen bis zu fast 7 m. Dieser rote See bietet deswegen besonderes Interesse, weil hier eine natürliche kolloidale Lösung vorliegt. Die qualitative Prüfung ergab die Anwesenheit von Eisen, Silicium und Aluminium.« *Die Umschau 27, S. 429*

DER MARS SIEHT VÖLLIG ANDERS AUS ALS GEDACHT

»Die von Mariner 9 zum Jahresanfang gelieferten Daten über das Marsrelief mußten in der Zwischenzeit entscheidend korrigiert werden. Die von Ultraviolet-Spektrometer-Messungen abgeleiteten Höhen wurden auf Grund parallel durchgeföhrter Okkultationsmessungen korrigiert. Daraus ergibt sich, daß die Marslandschaft Hellas, etwa von der Größe Mitteleuropas, eine sieben Kilometer tiefe Depression ist. Die Gräben [des] Tithonus-Lacus-Gebiets sind nicht 3000 Meter tief, sondern liegen bis zu 6500 Meter unter dem mittleren Niveau. Für einige Gebirge ergeben sich Höhen bis zu 20 Kilometer.« *Die Umschau 14, S. 446*

1972

WIE MAN SCHLUCKAUF LOSWIRD

»Der Schluckauf (Singultus) beruht auf einer unwillkürlichen Kontraktion des Zwerchfells. Ein altes Hausmittel, die Einnahme von einem Löffel Zucker, hat sich nun als wirksames Heilmittel erwiesen. E. Engleman und seine Mitarbeiter verabreichten an 20 Patienten, die an Schluckauf litten, je einen Teelöffel Zucker. Das führte zum Aufhören des Schluckaufs. Warum, ist unklar. Die Wirkung erfolgt augenblicklich, so daß sie kaum auf einem Glucose-Umsatz im Blut beruhen kann. Es scheint vielmehr, daß beim Verschlucken der Körnchen die Nervenendigungen in der Kehle gereizt und die Nervenimpulse [des] Schluckaufs überlagert werden.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 7, S. 277*

ERSTMALS MATRIXANZEIGE BEI OLYMPIA

»Um die Zuschauer im Olympia-Stadion über die Wettkämpfe und Ergebnisse nicht nur im Stadion selbst, sondern auch in allen anderen dreißig Wettkampfstätten zwischen München und Kiel zu informieren, hat die Olympia-Baugesellschaft mbH die Firma Elektron beauftragt, zwei große, rechnergesteuerte Matrix-Anzeigetafeln zu installieren. Ihre Schwesterfirma Datex hat die Matrix-Technik in den USA entwickelt

und für viele Sportstätten erfolgreich eingesetzt. In Europa erscheinen solche Anzeigetafeln erstmals zu den Olympischen Spielen.« *Elektronik 7, S. 253*

So sehen die Matrixtafeln aus.



MARATHON-LAUF			
ZWISCHENSTAND NACH 5 KM			
1.	117	WOLDE	MAMO ETI
2.	1166	ROELANTS	G BEL
3.	643	SASAKI	TOS JPN
4.	113	RYAN	MICHE NZL
4F	744	GEBRU	AMER ETI
4F	842	CLAYTON	JO AUS
7.	999	PEREZ	JUAN ESP
8.	412	USAMI	MIKI JPN
			+ 0:15:31.2
			+ 0:04.3
			+ 0:10.6
			+ 0:14.3
			+ 0:14.3
			+ 0:16.8
			+ 0:24.6

MOLEKULARBIOLOGIE ERREGER MIT ÜBERRASCHENDEN EIGENSCHAFTEN

Dank zahlreicher Mutationen verbirgt sich die Coronavirussvariante Omikron vor dem Immunsystem und findet neue Wege, menschliche Zellen zu befallen.



Megan Scudellari arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Boston (Massachusetts, USA)

► spektrum.de/artikel/2021575

► Die Omikron-Variante des Coronavirus Sars-CoV-2 dürfte derjenige Krankheitserreger sein, der sich in der gesamten bisherigen Menschheitsgeschichte am schnellsten verbreitet hat. Eine Person, die vom Masernvirus befallen ist – einem Rekordkeim, was die Infektiosität anbelangt – steckt binnen zwölf Tagen bis zu 15 andere an. Omikron hingegen, das im November 2021 auf der Bildfläche erschien, springt derart schnell von Mensch zu Mensch, dass aus einem Ansteckungsfall nach vier Tagen 6 geworden sind, nach acht Tagen 36 und nach zwölf Tagen 216. In Deutschland ist die Variante mit ihren verschiedenen Subtypen vollkommen dominant geworden und macht – Stand: Mitte Mai 2022 – nahezu 100 Prozent aller Sars-CoV-2-Infektionen aus.

Omkron gilt als »Variant of Concern« (VOC, deutsch: Besorgnis erregende Variante) des Coronavirus. Zu den ersten VOC, die auftauchten, gehörte der Alpha-Typ, erstmals nachgewiesen im September 2020. Damals wussten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler kaum etwas darüber, wie sich Mutationen im Erbgut des Virus auf seine Eigenschaften auswirken. Heute, mit dem gesammelten Wissen nach mehr als zwei Jahren weltweiter Pandemie, können Fachleute das viel besser einschätzen. Daher lässt sich zumindest für einige der etwa 50 Mutatio-

GAMECHANGER Das Virus Sars-CoV-2 (Illustration) richtete weltweit verheerende Schäden an. Es hat viele Untertypen hervorgebracht.



AUF EINEN BLICK UMFASSEND VERÄNDERT

- 1 Vom Virus Sars-CoV-2, dem Verursacher der weltweiten Covid-19-Pandemie, existieren zahlreiche Unterformen.
- 2 Eine davon ist die Omikron-Variante, die erstmals im November 2021 auftauchte.
- 3 Omikron ist an etlichen Stellen mutiert, was ihm neue und überraschende Eigenschaften verleiht. Zusammengekommen machen sie das Virus zum bisher infektiösesten überhaupt.

nen, die Omikron im Vergleich zur Urversion aufweist, angeben, wie diese zur schnellen und effektiven Verbreitung des Erregers beitragen.

Die Omikron-Variante trägt doppelt so viele Mutationen wie andere VOC, und ihr Subtyp BA.2 zeigt sich genetisch besonders stark verändert. Ihre Spike- oder Stachelproteine (siehe »Spektrum« Dezember 2021, S. 38) weisen 13 Abwandlungen auf, die bei anderen Varianten selten vorkommen. Diese Modifikationen verleihen dem Erreger neue und überraschende Eigenschaften. Er wird damit gewissermaßen zu einem maskierten Saboteur, der den menschlichen Organismus blitzschnell infiltriert.

Unter den zahlreichen Veränderungen des Omikron-Typs stechen vier besonders hervor. Drei davon tragen dazu bei, dass die Variante unserer Körperabwehr leicht entkommt und hochansteckend ist, während die vierte vermutlich bewirkt, dass Omikron eher milde Krankheitsverläufe verursacht.

Gegen die meisten Antikörpertherapien unempfindlich

Omkron ist beispiellos gut darin, sich vor dem Immunsystem zu verstecken. Hierbei hilft ihm eine Art Verkleidung. Wenn Coronaviren eine menschliche Zelle infizieren, spielen ihre Rezeptor-Bindungsdomänen (RBD) eine wichtige Rolle: faustförmige Klumpen aus Aminosäuren, die auf den viralen Stachelproteinen sitzen. Sie klammern sich an ein Molekül auf der Außenseite der Zielzelle, den so genannten ACE2-Rezeptor. Passende Antikörper des Immunsystems verhindern das, indem sie die RBD erkennen und sich wie ein Klettverschluss daran heften, so dass das Virus nicht mehr an den menschlichen ACE2-Rezeptor koppeln kann.

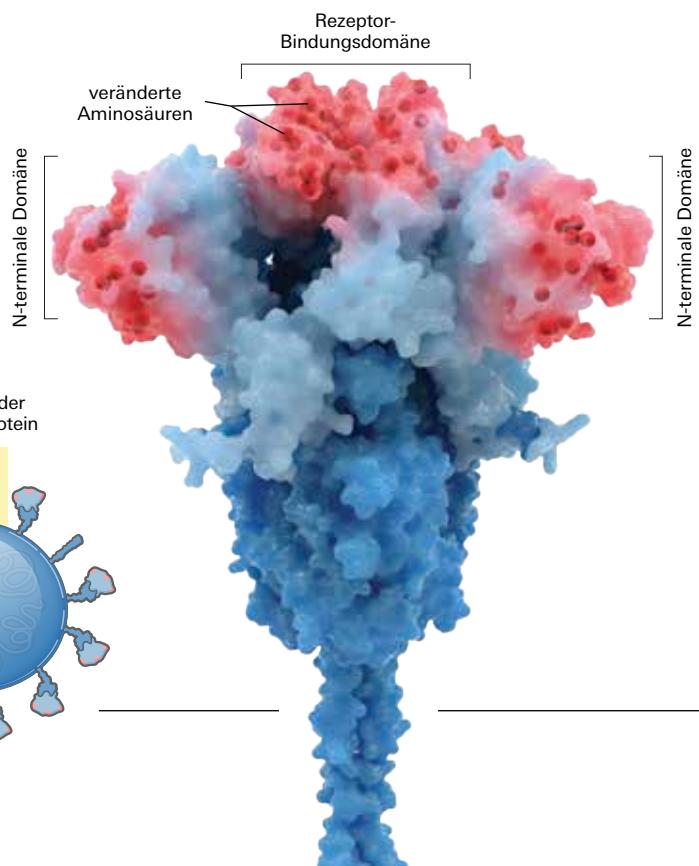
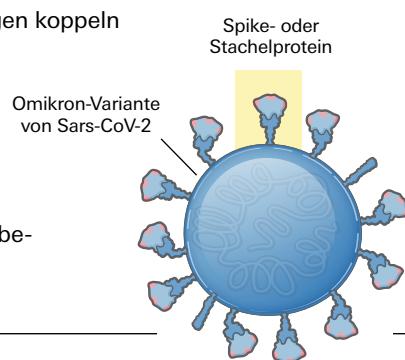
Bei früheren Coronavirus-Varianten waren eine, zwei oder drei Aminosäuren der RBD mutiert – was die Struktur gerade so sehr abänderte, dass sie der Erkennung durch einige, aber nicht durch alle Antikörper des Immunsystems entging. Omikron hingegen besitzt ganze 15 Änderungen in der RBD, viele davon an Stellen, die für die Antikörperbindung wichtig sind. Das verleiht dem Virus eine starke Tarnung, mit der es sich der menschlichen Körperabwehr wirksam entzieht. »Es ist, als hätte sich der Erreger eine Gesichtsmaske aufgezogen«, sagt Matthew McCallum, Biochemiker an der University of Washington.

In einer Studie hat McCallum gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen gezeigt, welche Folgen das für die medizinische Behandlung hat. Nur eines von acht Antikörperpräparaten, die in Krankenhäusern zur Therapie von Covid-19-Patienten dienen (und auf natürlichen Antikörpern basieren), erkennt die RBD der Omikron-Variante. Weitere Forschungsarbeiten belegen: Veränderungen der RBD und einer zweiten Region des Stachelproteins, der so genannten N-terminalen Domäne, befähigen das Virus dazu, sich der Antikörperreaktion zu entziehen, die der Körper nach Impfungen oder vorangegangenen Infektionen entwickelt hat. Infolgedessen ist Omikron schwer zu bremsen und verbreitet sich blitzschnell. Glücklicherweise verhindern die bei uns eingesetzten Impfstoffe schwere Krankheitsverläufe, vor allem nach Auffrischungsimpfungen.

Wegen der umfangreichen Änderungen im Stachelprotein der Omikron-Variante enthält dieses einige chemische Strukturen nicht mehr, mit denen es sich zuvor an den ACE2-Rezeptor heftete. Das wird jedoch von weiteren Mutationen kompensiert, die für zusätzliche Affinität

Immunflucht

Antikörper des Immunsystems attackieren das Virus Sars-CoV-2, indem sie sich an bestimmte Bereiche seines Spikeproteins heften. Die Omikron-Variante trägt jedoch viele genetische Mutationen, was zu zahlreichen veränderten Aminosäuren (rote Kugeln) in zwei wichtigen Abschnitten (rot eingefärbt) des Proteins führt. Hierbei handelt es sich um die Rezeptor-Bindungsdomäne (RBD) sowie die N-terminale Domäne. Infolge dieser Abwandlungen koppeln etliche Antikörper nicht mehr so gut an das Spikeprotein und das Immunsystem tut sich schwerer damit, den Erreger zu bekämpfen.



VERONICA FALCONIERI HAYS / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2022

zwischen dem viralen Eiweiß und seiner menschlichen Zielstruktur sorgen. »Die Omikron-Spikes haben eindeutig Teile verloren, die für die Bindung an ACE2 wichtig sind, dafür aber andere Eigenschaften erworben, die dies ausgleichen«, sagt der Biochemiker Sriram Subramaniam von der University of British Columbia, Erstautor einer Studie dazu, die 2022 im Fachblatt »Science« erschien.

Bei anderen Sars-CoV-2-Varianten sind zwei Untereinheiten des Stachelproteins namens S1 und S2 lose miteinander verknüpft. Infolgedessen lassen sie sich leicht voneinander trennen – eine Aufspaltung, die erst das Verschmelzen des Virus mit der Wirtszelle ermöglicht (siehe »Spektrum« Dezember 2021, S. 38). Allerdings ist das Band zwischen S1 und S2 so schwach, dass es oft schon reißt, bevor der Erreger einem Ziel nah genug gekommen ist. Das Virus hat dann gewissermaßen sein Pulver zu früh verschossen, was die Chance einer erfolgreichen Infektion senkt.

Bei Omikron hingegen bewirken Mutationen eine festere Verknüpfung zwischen der S1- und S2-Untereinheit des Spikeproteins, wie mehrere Forschungsstudien ergeben haben. »Das Virus schützt sich damit sozusagen vor einer verfrühten Auslösung seines Enterhakens«, erläutert Shan-Lu Liu, Direktor des Forschungsprogramms »Viren und aufkommende Pathogene« an der Ohio State University. »Wenn der Erreger zur richtigen Zeit am richtigen Ort ist, wird die Trennung seiner Spike-Untereinheiten getriggert, so dass er in die Wirtszelle gelangt – aber nicht vorher.«

Alle bisherigen Sars-CoV-2-Varianten benötigten darüber hinaus das Protein TMPRSS2 auf der Oberfläche menschlicher Zellen, um deren Membran zu durchdringen. Omikron tut das nicht. Es nimmt einen völlig anderen Weg in die Wirtszelle, indem es quasi durch ihre Hintertür schlüpft, statt durch die Vordertür zu kommen.

Im Innern der Blase

Während andere Varianten sowohl ACE2 als auch TMPRSS2 benötigen, um ihr Erbgut direkt in die Zielzelle zu injizieren, ist Omikron nur auf ACE2 angewiesen. Daran koppelt es und wird dann in ein membranumhülltes Bläschen eingeschlossen, ein so genanntes Endosom. Dieses driftet ins Zytoplasma des Wirts, wo das Virus ausricht und sich zu vervielfältigen beginnt.

Experten zufolge verhilft das der Omikron-Variante zu zwei Vorteilen. Erstens besitzen viele menschliche Zellen kein TMPRSS2 auf ihrer Außenseite. Das Virus kann sie trotzdem infizieren, da es das Oberflächenprotein nicht benötigt – was ihm ein breiteres Angebot an potenziellen Wirten verschafft. »Wahrscheinlich stehen dem Erreger sieben- bis zehnmal mehr Zellen als geeignete Ziele zur Verfügung, wenn er Endosomen als Eintrittspforte nutzt, statt TMPRSS2 zu gebrauchen«, sagt Wendy Barclay, Virologin am Imperial College London.

Zweitens: Während frühere Sars-CoV-2-Varianten wie der Delta-Typ häufig TMPRSS2-reiche Zellen tief in der Lunge befallen, vermehrt sich Omikron eher in den oberen Atemwegen, was mutmaßlich zur schnellen Verbreitung von Mensch zu Mensch beiträgt. »Das Virus wird so leichter

durch Husten, Niesen und Ähnliches weitergegeben«, erklärt Joe Grove, Virologe an der University of Glasgow.

Die vierte der markanten Veränderungen bei Omikron trägt nicht dazu bei, den Erreger ansteckender zu machen. Stattdessen beschert sie ihm eine überraschende Schwäche, die ihn anfälliger für die angeborene Immunabwehr (siehe »Spektrum« August 2021, S. 12) macht.

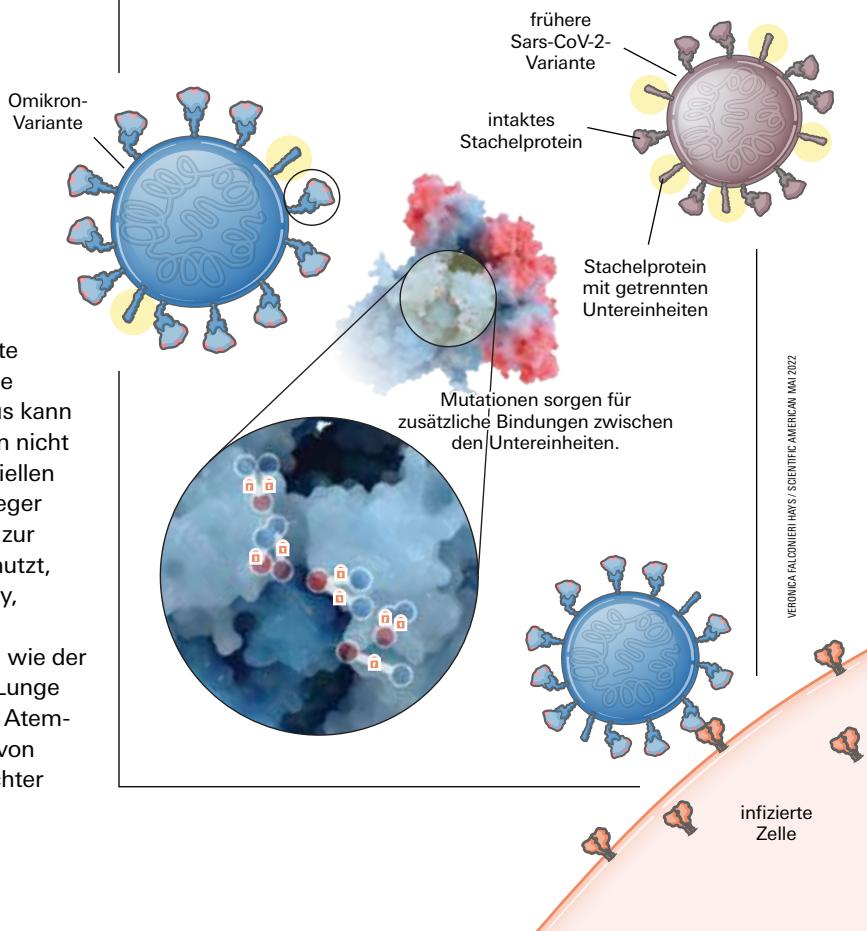
Forscher und Forscherinnen haben untersucht, wie sich eine Infektion mit der Omikron- beziehungsweise der Delta-Variante auf die Ausschüttung von Interferonen

Stabilität des Spikeproteins

Das virale Stachelprotein besitzt zwei Untereinheiten, die voneinander getrennt werden müssen, damit der Erreger mit seiner Wirtszelle verschmilzt. In früheren Sars-CoV-2-Varianten sind sie nur lose miteinander verbunden und separieren sich deshalb oft schon, wenn noch gar keine geeignete Zielzelle in der Nähe ist. Der Erreger hat damit quasi sein Pulver zu früh verschossen.

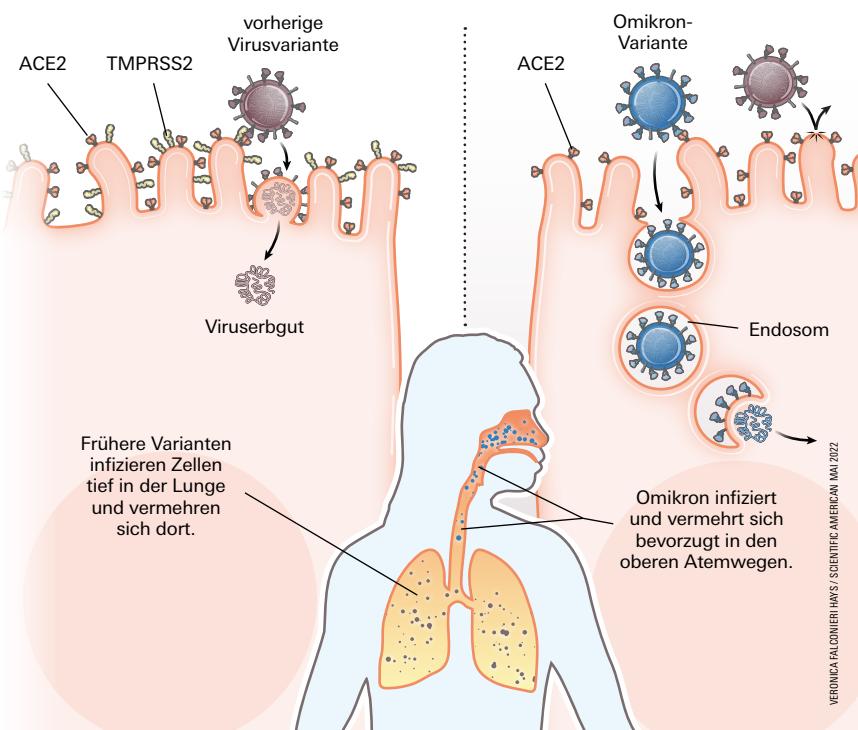
Bei der Omikron-Variante bestehen zusätzliche Bindungen zwischen den beiden Untereinheiten des Spikeproteins, als S1 (hellblau) und S2 (dunkelblau) bezeichnet. Das verhindert deren vorzeitiges Abspalten voneinander.

Eine größere Zahl intakter Stachelproteine ermöglicht es der Omikron-Variante, mehr menschliche Zellen zu infizieren.



Alternativer Zugang zur Wirtszelle

Vorherige Sars-CoV-2-Varianten nutzen zwei Proteine ihrer Zielzellen, um ins Zellinnere zu gelangen, nämlich die Eiweiße ACE2 und TMPRSS2. Mit Hilfe dieser beiden Moleküle verschmelzen die Erreger ihre Membran mit jener des Wirts und injizieren anschließend ihr Erbgut direkt in den Zellinnenraum. Omikron dagegen benötigt nur ACE2, um ins Zellinnere vorzudringen, und befällt daher ebenso Zellen ohne TMPRSS2. Das gelingt dem Virus, indem es in ein membranum-hülltes Bläschen (Endosom) eingeschlossen wird, das der Wirt in sich aufnimmt. Im Zellinnern angekommen, bricht das Virus aus und beginnt sich zu vermehren.



auswirkt. Dabei handelt es sich um Proteine des Immunsystems, die Zellen der angeborenen Immunabwehr auf Ein- dringlinge aufmerksam machen. Delta zeigte sich meisterhaft dazu in der Lage, die Interferon-Reaktion zu unterdrücken – aber Omikron versagt hier vollständig. Und nicht nur das: Omikron förderte die Interferon-Antwort sogar.

Warum das so ist, wissen die Fachleute nicht. Mindestens 11 der 26 Proteine des Coronavirus Sars-CoV-2 interagieren mit dem Interferon-System, und viele davon sind bei Omikron mutiert. Aber auch ohne dass der genaue Mechanismus bekannt ist, deutet sich an, welche Folgen diese Veränderung hat.

Eher milde Verläufe verursacht

Da die Lunge eine stärkere Interferon-Reaktion entwickelt als die oberen Atemwege, könnte Omikrons Anfälligkeit gegenüber diesem Abwehrmechanismus verhindert haben, dass der Erreger tief ins Atemorgan vordringt. »Omkron scheint schlechter dazu in der Lage zu sein, den Körper und die Lunge tief zu infiltrieren und schwere Krankheitsverläufe zu verursachen«, sagt Martin Michaelis, Biologe an der University of Kent in England. »Das wäre eine immunologisch sinnvolle Erklärung dafür, warum das Virus eher leichte Erkrankungen hervorruft.«

Zwar waren die Auswirkungen der Omikron-Variante für die Gesamtbevölkerung durchaus nicht milde: Die explosionsartige Verbreitung des Virus führte zu einem enormen Anstieg der Krankenhausinweisungen und Todeszahlen sowie zu einer Rekordzahl hospitalisierter Kinder. Doch der Anteil der problematischen Verläufe schien zu sinken. Für Personen, die nicht geimpft sind oder andere Risikofaktoren

aufwiesen, bestehende Statistiken zufolge weiterhin eine erhöhte Gefahr, schwer zu erkranken oder zu sterben.

Niemand weiß, welche Eigenschaften zukünftige Varianten von Sars-CoV-2 haben werden. Sicher ist nur, dass wir mit weiteren Überraschungen rechnen müssen. »Ich glaube nicht, dass wir die Pandemie als beendet betrachten können«, meint Barclay. Da das Virus in seinen diversen Subtypen weiterhin global grasiert und sich dabei evolutionär unablässiger weiterentwickelt, wird es neue Mechanismen der Übertragung sowie Vervielfältigung hervorbringen – einschließlich solcher, an die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler heute noch gar nicht denken. ▲

QUELLEN

Barclay, W. et al.: The Sars-CoV-2 variant, Omicron, shows rapid replication in human primary nasal epithelial cultures and efficiently uses the endosomal route of entry. bioRxiv 10.1101/2021.12.31.474653, 2022

Hoffmann, M. et al.: The Omicron variant is highly resistant against antibody-mediated neutralization: Implications for control of the Covid-19 pandemic. Cell 185, 2022

Kumar, S. et al.: Omicron and Delta variant of Sars-CoV-2: A comparative computational study of spike protein. Journal of Medical Virology 94, 2022

McCallum, M et al.: Structural basis of Sars-CoV-2 Omicron immune evasion and receptor engagement. Science 375, 2022

Subramanianam, S. et al.: Sars-CoV-2 Omicron variant: Antibody evasion and cryo-EM structure of spike protein-ACE2 complex. Science 375, 2022

Lenovo macht Schule.

Smarter technology for all

Lenovo

Smarter



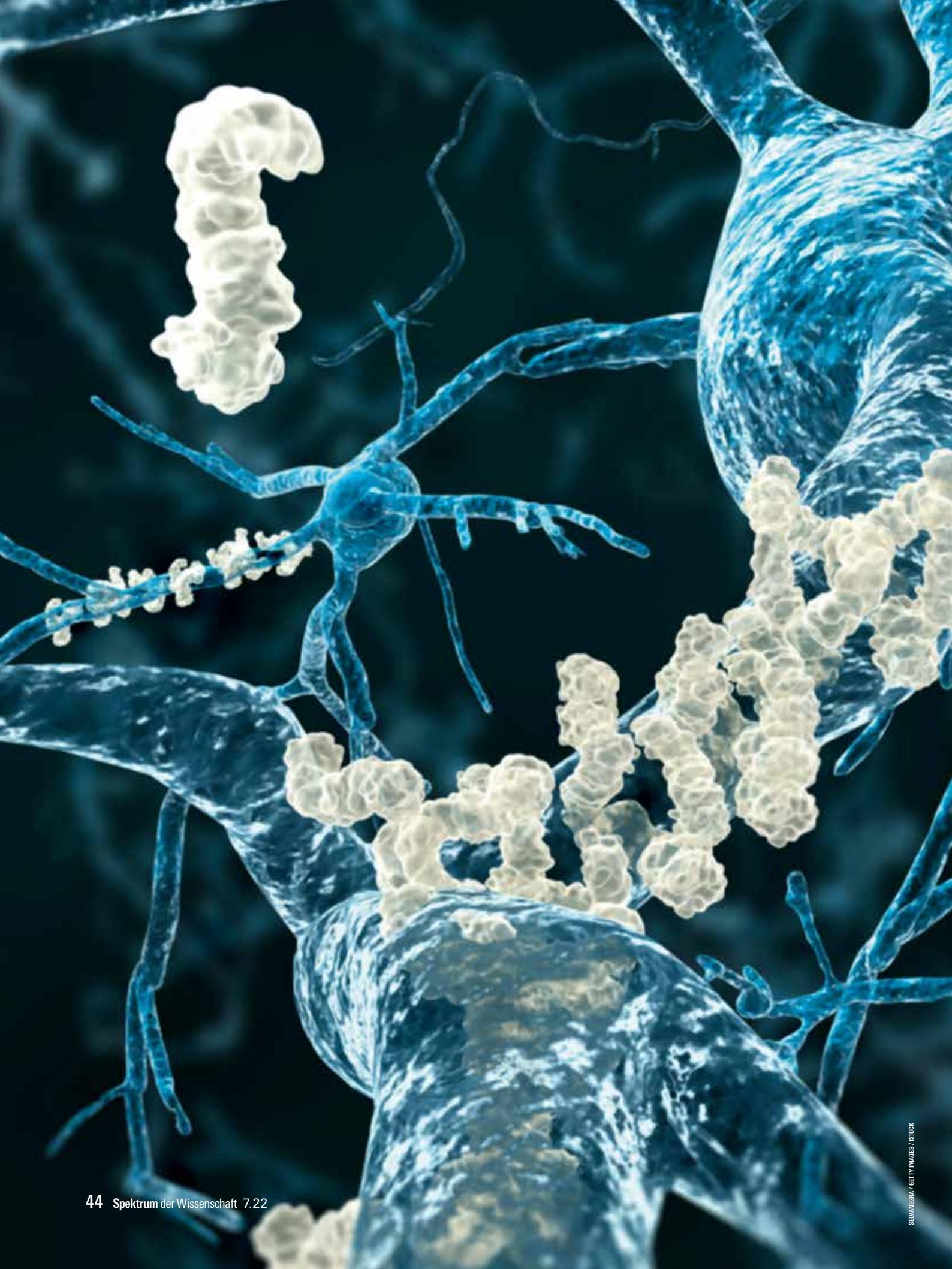
Getestet für die Verwendung unter erschwerten Bedingungen wie Spritzwasser, Erschütterungen oder Staub – was auch immer der Schulalltag bringt. **Wir beraten Sie gerne, Tel. 0201 22099 844.**



Windows 11

A more focused Start experience

www.lenovo.com/EDUCATION





MEDIZIN LÄNGER JUNG DANK ZELLULÄRER MÜLLABFUHR?

Biologische Entgiftungsmechanismen könnten es ermöglichen, altersbedingte Krankheiten zu bekämpfen.

Elie Dolgin arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Somerville, Massachusetts.

► spektrum.de/artikel/2021581



ARAM BOGHOSIAN

MOLEKÜLARER ABFALL Verklumpen schadhafte Proteine im Gehirn, geht das häufig mit Einschränkungen der Hirnfunktion einher.

SERIE

Altern

Teil 1: Juni 2022

Wie lange können wir leben?

Michael Eisenstein

Was uns altern lässt

Emily Sohn

Teil 2: Juli 2022

Länger jung dank zellulärer Müllabfuhr?

Elie Dolgin

Teil 3: August 2022

Alternde Gesellschaften

Benjamin Plackett

Dass es so lange dauern würde, hatte Salwa Sebti nicht vermutet. Im Jahr 2014 hatten sie und ihr Team an der University of Texas in Dallas begonnen, mit Mäusen zu experimentieren. Sie führten eine Studie mit Nagern durch, die genetisch derart verändert waren, dass bei ihnen die Entgiftung des Körpers überdurchschnittlich gut funktionierte. Ziel der Versuche war es herauszufinden, ob die so genannte Autophagie das Altern verlangsamt beziehungsweise die Gesundheit in späteren Lebensabschnitten verbessert. Autophagie (griechisch »sich selbst fressen«) ist ein Mechanismus, mit dem Zellen ihre eigenen Bestandteile abbauen und wiederverwerten – von defekten Proteinen bis hin zu funktionslos gewordenen Organellen (siehe »Spektrum« Dezember 2008, S. 58). Mit Hilfe dieser Müllabfuhr befreien sich die Körperzellen von schadhaften Komponenten. In der Studie von Sebti und ihrem Team vergingen fast zwei Jahre – eine Zeitspanne, die beim Menschen etwa sieben Jahrzehnten entspricht –, bevor sich bei den Mäusen deutliche Anzeichen einer verbesserten Gesundheit zeigten.

Doch das Warten lohnte sich. Nager mit verstärkter Autophagie bekamen seltener spontane Krebserkrankungen, lebten um etwa zehn Prozent länger und hatten weniger stark vernarbte Herzen und Nieren als Artgenossen, bei denen die Entgiftung normal arbeitete. Sebti konnte es kaum glauben, als sie die Messdaten analysierte und dabei auf diese Effekte stieß.

Andere Fachleute hatten zuvor schon für Würmer und Fliegen berichtet, eine intensivere Autophagie verzögerte das Altern. Aber die Studie, an der Sebti beteiligt war, zeigte das erstmals für Säuger. In weiteren Versuchen paarte das Team Mäuse, deren zelluläre Müllabfuhr genetisch verstärkt war, mit diesbezüglich unveränderten Artgenossen, die zu verschiedenen Krankheiten neigten. Dabei ließen sich gesundheitsfördernde Wirkungen auf die Nachkommen feststellen. Das Ankurbeln der zellulären Entgiftung führte dazu, dass die Funktion der Stammzellen in alternden Mäusegehirnen länger erhalten blieb; es wirkte dem kognitiven Abbau bei alzheimerkranken Nagern entgegen und bremste die altersbedingte Degeneration von Organen.

Immer mehr Start-ups im Biotechnologiesektor versuchen jetzt, Medikamente zu entwickeln, die solche Antiaging-Wirkungen haben. Autophagie sei »ganz klar ein



BEEINTRÄCHTIGT Die Parkinsonkrankheit kann einfache Tätigkeiten wie das Löffeln einer Suppe unmöglich machen. Forscher arbeiten an neuen Behandlungsansätzen auf Basis der Autophagie.

MARAVELICK / GETTYIMAGES / ISTOCK

grundlegender Prozess, der bei enorm vielen Krankheiten eine Rolle spielt«, betont beispielsweise Peter Hamley, Chefwissenschaftler bei der Firma Samsara Therapeutics in Oxford, Großbritannien. Das 2018 gegründete Unternehmen entwickelt Ansätze, um neurodegenerative und seltene Erbkrankheiten zu behandeln, indem die zelluläre Müllabfuhr aktiviert wird. »Das ist ein sehr verheißungsvoller Bereich der Arzneimittelforschung«, meint Hamley. Und es ist eine große Herausforderung.

Schritt für Schritt aufräumen

Viele bezeichnen die Autophagie als zelluläres System der Abfallbeseitigung. So wie die städtische Müllabfuhr das Sammeln, Transportieren und Entsorgen umfasst, muss auch die Autophagie der Zelle einem koordinierten, mehrstufigen Ablauf folgen. Zunächst werden die schadhaften Bestandteile in sackähnlichen Strukturen verstaut, den so genannten Phagophoren. Diese reifen zu Frachtbehältern namens Autophagosomen, welche ihrerseits mit Lysosomen verschmelzen – Zellorganellen, bei denen es sich quasi um Demontageanlagen handelt. Erst dort beginnt die Zerlegung des Mülls.

In jeder Phase dieses Ablaufs kommt es hin und wieder zu Fehlern – und zwar umso öfter, je mehr eine Zelle altern. Solange nicht vollständig verstanden ist, welcher Autophagie-Teilprozess bei welcher altersbedingten Krankheit gestört ist, erscheint ein medikamentöser Eingriff zu risikant. Denn Arzneistoffe, die an der falschen Stelle ansetzen, würden eher schaden als nutzen. Ein Medikament beispielsweise, das die Zelle dazu bringt, vermehrt schadhafte Proteine in Phagophoren zu verpacken, könnte einen Stau im Stoffwechsel herbeiführen. »Wenn nämlich die nachgeschaltete Demontage nicht richtig funktioniert, hat man am Ende nur einen großen Haufen Müllsäcke mit Proteinmolekülen darin«, erläutert Tim Sargeant, der sich am South Australian Health and Medical Research Institute in Adelaide mit zellulären Entgiftungsmechanismen beschäftigt.

Aus solchen Gründen geben sich viele Antiaging-Forscher vorsichtig, was das klinische Potenzial der Autophagie

AUF EINEN BLICK LÄNGER JUNG

- 1 Im Zuge der so genannten Autophagie entsorgen Zellen defekte Bestandteile.
- 2 Diese »Müllabfuhr« wirkt einer Ansammlung toxischer Stoffe entgegen, die langfristig die Zellen schädigt.
- 3 Forscher versuchen, die Autophagie künstlich anzuregen, um die Entgiftung des Organismus zu fördern und altersbedingte Krankheiten einzudämmen.

gie betrifft. Zumal es bei etlichen der vorgeschlagenen Ansätze keine belastbaren Belege dafür gibt, dass sie im Mausmodell oder gar beim Menschen funktionieren. »Klar scheint: Die Autophagie-Intensität in bestimmten Körperzellen aufrechtzuerhalten, wäre für die Behandlung vieler altersbedingter Krankheiten vorteilhaft – daher ist es sinnvoll, in diese Richtung weiterzuforschen«, sagt Stephen Helliwell, leitender Wissenschaftler bei Rejuveron Life Sciences, einem Biotech-Unternehmen mit Sitz in Zürich. »Aber es ist eine Sache, Experimente mit Würmern und Fliegen durchzuführen – und eine ganz andere, daraus sichere Anwendungen für den Menschen zu machen.«

Manche Onkologen entwickeln Ansätze, um die zelluläre Müllabfuhr zu hemmen, da sie manchmal das Wachstum und die Streuung von Tumoren begünstigt. In wieder anderen Fällen verhindert sie das Entstehen neuer Tumoren. Das zeigt: Eingriffe in diesen Prozess können ungeahnte Folgen haben. Autophagie anzukurbeln, um Alterserscheinungen entgegenzuwirken, ist somit ein heikles Unterfangen.

Das Unternehmen Life Biosciences in Boston, Massachusetts, hat es auf eine spezielle Spielart abgesehen, die so genannte Chaperon-vermittelte Autophagie (CMA). Dabei treten Helferproteine namens Chaperone in Wechselwirkung mit ihren jeweiligen Zielproteinen und befördern sie zu einem Lysosom, welches sie dann abbaut. »CMA ist sehr spannend, weil sie anscheinend eine wichtige Rolle in der biologischen Alterung spielt und somit viel versprechende Ansätze für therapeutische Eingriffe bietet, die aber noch kaum erforscht sind«, sagt Joan Mannick, Leiterin der Forschungs- und Entwicklungsabteilung bei Life Biosciences.

Zu jenen, die auf diesem Gebiet arbeiten, gehört die Zellbiologin Ana María Cuervo vom Albert Einstein College of Medicine (New York). Sie forscht über Erkrankungen, die mit Stoffwechselstörungen und Neurodegeneration einhergehen. Im Jahr 2013 identifizierten sie und ihr Kollege Evripidis Gavathiotis gemeinsam eine Klasse von Molekülen, die CMA ankurbeln, indem sie die Aufnahme schadhafter

ABBAU EINES MITOCHONDRIUMS Im Zuge der Autophagie können Zellen sogar komplett Organellen beseitigen, etwa defekte Mitochondrien. Das ist unter anderem für die Hirngesundheit bedeutsam.

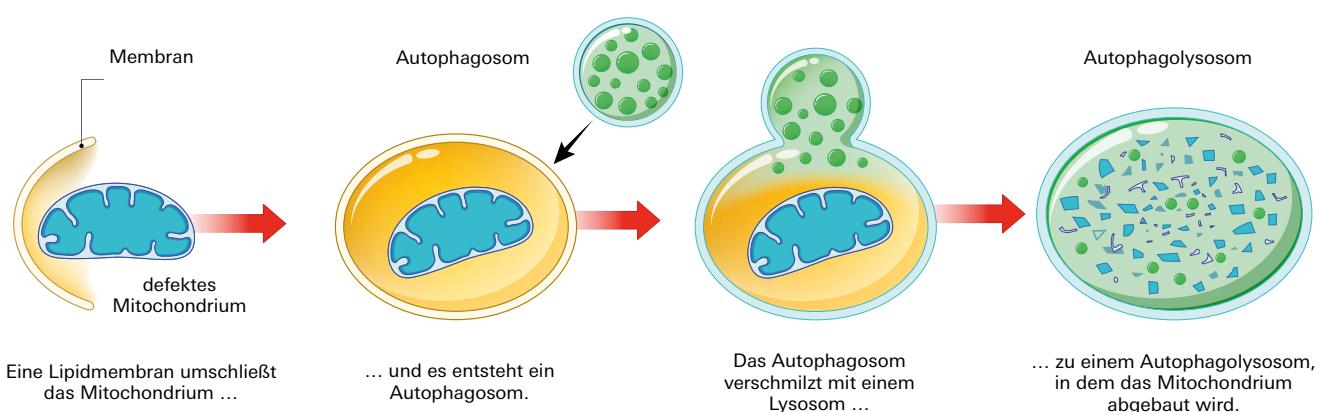
ter, von Chaperonen begleiteter Proteine ins Lysosom fördern. In Experimenten mit Labormäusen linderten diese Substanzen die Symptome der Alzheimerkrankheit und stellten die Intaktheit blutbildender Stammzellen im Knochenmark wieder her. Die Arzneistoffkandidaten wirkten im Tierversuch so gut, dass »mein Mann scherzte, er wolle sie jetzt auch einnehmen«, erzählt Cuervo.

Cuervo und Gavathiotis haben ihre Technologie an Life Biosciences lizenziert und sind nun als wissenschaftliche Berater für das Unternehmen tätig. Unterstützt von der gemeinnützigen Organisation »Alzheimer's Drug Discovery Foundation« in New York City, optimiert Life Biosciences die Arzneistoffkandidaten derzeit für die Anwendung am Menschen. Klinische Versuche mit Personen, die an altersbedingten neurodegenerativen Erkrankungen leiden, sollen bald folgen.

Helperproteine sorgen für mehr Sicherheit

CMA funktioniert über einen spezifischen Signalmechanismus. Deshalb sollten Medikamente, die diesen Prozess stimulieren, lediglich zu einem Abbau solcher Zellbestandteile führen, die von Chaperonen befördert werden, wie Cuervo betont. Das biete eine höhere Anwendungssicherheit als Strategien, die auf eine relativ unspezifische Aktivierung der zellulären Müllabfuhr zielen. Die Kehrseite ist, dass CMA-Stimulation eben nur bei Proteinen funktioniert, die in Wechselwirkung mit Chaperonen stehen. Für andere Eiweiße – oder gar für eine verstärkte Demontage ganzer Zellorganellen – lässt sie sich nicht nutzen. Hierfür erforschen Biotech-Unternehmen verschiedene Ansätze, um Autophagie-Prozesse breiter und weniger spezifisch anzukurbeln. Dabei haben sie unter anderem die Beseitigung von Mitochondrien im Blick, den »Kraftwerken der Zelle«.

Wissenschaftler beim Unternehmen MindRank AI in Hangzhou (China) haben Computeralgorithmen auf der Grundlage maschinellen Lernens genutzt, um Molekülstrukturen zu finden, die den Abbau schadhafter Mitochondrien fördern – ein Prozess namens Mitophagie. Die Algorithmen lieferten eine Liste von 18 potenziell geeigneten Substanzen. Gemeinsam mit dem Gerontologen Emanuele Fang von der Universität Oslo und dem Pharmakologen Jia-Hong Lu von der Universität Macau führte das Unternehmen sodann Experimente mit menschlichen Zellen, Würmern und Mäusen durch. Dabei ließ sich die Liste auf zwei Arzneimittlkandidaten redu-



zieren, die beide auf ein Protein namens PINK1 zielen. Jenes Eiweiß spielt eine wichtige Rolle beim Aufrechterhalten der Mitochondrienfunktion. Wie die Forscher 2021 nachwiesen, verbessern die beiden Substanzen die Gedächtnisleistungen von Versuchstieren, die an Alzheimer-Demenz leiden.

Mittlerweile sind große Pharmaunternehmen auf den Ansatz aufmerksam geworden. So hat der Arzneimittelriese AbbVie mit Sitz in North Chicago, Illinois, kürzlich dem Kauf der Firma Mitokinin zugestimmt. Das kleine Biotech-Unternehmen in San Francisco entwickelt Wirkstoffe für die Behandlung der Parkinsonkrankheit, die sich gegen PINK1 richten. »Stimuliert man die Mitophagie, kommt es zu einer schnelleren Beseitigung defekter Mitochondrien«, sagt Nicholas Hertz, leitender Wissenschaftler bei Mitokinin. Das wiederum scheine neuronale Funktionen und die Hirngesundheit zu verbessern.

Schon heute sind Arzneistoffe gebräuchlich, die Autophagie-Prozesse breit stimulieren. Metformin, ein gängiges Mittel zum Behandeln von Diabetes Typ 2, sowie das Immunsuppressivum Rapamycin, das den Organismus daran hindert soll, Transplantate abzustoßen, verstärken beide die zelluläre Müllabfuhr. Das erreichen sie, indem sie das Protein mTOR beeinflussen, einen wichtigen Akteur der Signalweiterleitung im Körper und einen Hauptregulator mehrerer Autophagie-Schritte.

In Tierversuchen haben Metformin und Rapamycin bewiesen, dass sie die Lebenserwartung erhöhen und das allgemeine Wohlbefinden fördern können. Da sie aber auf molekularer Ebene zahlreiche verschiedene Wirkungen ausüben, »kann man nie sicher sein, welcher dieser Effekte durch Autophagie vermittelt wird«, sagt Beat Nyfeler, Biochemiker an den Novartis Institutes for BioMedical Research in Basel. mTOR ist ein zentraler Knotenpunkt der Signalweiterleitung und steuert zudem die zelluläre Proteinproduktion – seine Beeinflussung durch die genannten Arzneistoffe führt daher oft zu unerwünschten Nebenwirkungen. »Ich denke, um Autophagie-Stimulation wirklich

klinisch anwendbar zu machen, müsste man etwas finden, das von mTOR unabhängig ist«, meint Nyfeler.

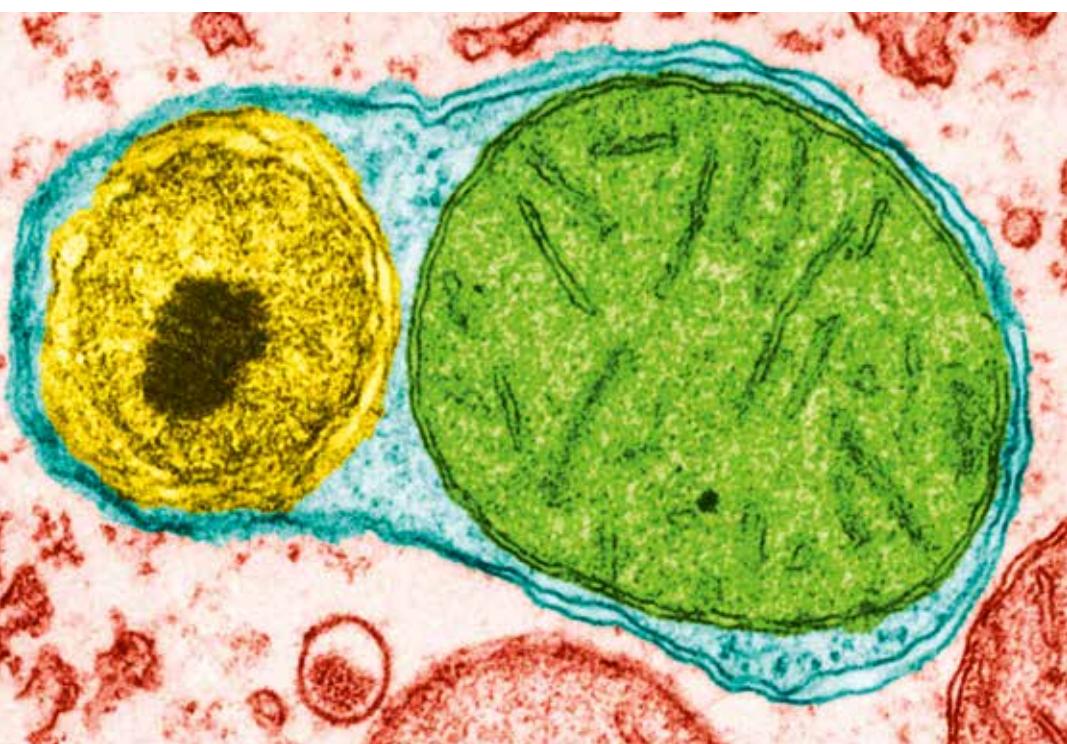
David Rubinsztein, Neurobiologe an der University of Cambridge, hat einen Weg gefunden, die zelluläre Abfallentsorgung mit Hilfe eines zweckentfremdeten Blutdrucksenkers anzuregen. Der Arzneistoff Felodipin blockiert den Kalziumeinstrom in Muskelzellen, entspannt so die Blutgefäße – und erhöht die Autophagie-Aktivität. In Versuchen mit Mäusen, die an den tierischen Entsprechungen zur Parkinson- und zur Huntingtonkrankheit litten, zeigten Rubinsztein und sein Team: Felodipin hilft, schadhafte Proteine aus dem Gehirn zu beseitigen, die zum Verklumpen neigen. Das verbessert die Hirnfunktion. In einer klinischen Studie möchte das Team nun untersuchen, ob Felodipin die Menge mutierter Huntingtinproteine in der Rückenmarksflüssigkeit von Huntingtonpatienten verringert.

Drei von Zehntausend

Andere Unternehmen versuchen unterdessen, selektiv Autophagie aktivierende Wirkstoffe zu entwickeln, die sich gegen diverse Ziele richten. Bei Samsara Therapeutics haben Forscher kultivierte Zellen zehntausenden verschiedenen Arzneistoffkandidaten ausgesetzt und dann in Tests überprüft, ob diese irgendeine Wirkung auf Autophagie-Prozesse haben. Die Arbeiten förderten drei viel versprechende potenzielle Mittel zu Tage, die das Team jetzt näher unter die Lupe nimmt, wie der dortige Chefwissenschaftler Peter Hamley beschreibt.

Bei Caraway Therapeutics in Cambridge, Massachusetts, verfolgt man hingegen einen stärker zielgerichteten Ansatz. Die leitende Wissenschaftlerin Magdalene Moran setzt auf Erkenntnisse der Humangenetik, um Arzneistoffe zu entwickeln. Es ist bekannt, dass Mutationen in manchen Proteinen, die für das Funktionieren der Lysosomen wichtig sind, verheerende neurodegenerative Erkrankungen auslösen. Daher kamen Moran und ihr Team auf die Idee, das Aktivieren ebener Eiweiße könnte einen therapeutischen Nutzen haben. »Wir versuchen, bereits bestehende Signalwege zu

MÜLLWAGEN IM MINI-FORMAT Diese nachträglich eingefärbte Aufnahme eines Elektronenmikroskops zeigt eine so genannte autophagische Vakuole: einen membranumhüllten Bereich etwa in Pflanzen- oder Hefezellen, wo – im Zuge der Autophagie – Zellmaterial abgebaut wird.



DON W. FAWCETT / SCIENCE PHOTO LIBRARY



PROFESSORS P. MOTTA & T. NAGIJO / SCIENCE PHOTO LIBRARY

KRAFTWERK DER ZELLE
Elektronenmikroskopische Aufnahme des Mitochondriums einer Darmzelle. Mitochondrien sind als Energielieferanten ihrer Mutterzellen unentbehrlich. Sind sie aber defekt und arbeiten fehlerhaft, können sie verschiedene Erkrankungen verursachen.

verstärken, um so Krankheiten zu verhindern oder zu bekämpfen«, sagt sie.

Ebenfalls in Cambridge ansässig ist das Unternehmen Casma Therapeutics. Es fokussiert sich auf spezifische Zielmoleküle, um Autophagie in Zellen anzukurbeln, bei denen der Abbauprozess gestört ist. Die Firma, mitgegründet von Beth Levine vom University of Texas Southwestern Medical Center, entwickelt eine Technologie, die auf möglichst alle störenden Zellbestandteile anwendbar sein und diese dem Autophagie-Prozess zuführen soll. »Wir versuchen, den Autophagie-Apparat dazu zu erziehen, eine krank machende Zielstruktur zu verfolgen und sie aus der Zelle zu entfernen«, erklärt der wissenschaftliche Leiter bei Casma Therapeutics, Leon Murphy.

Forschungsteams der Universität Tohoku in Sendai, Japan, und der Fudan-Universität in Schanghai, China, haben diesen Ansatz erstmals 2019 beschrieben. Sie stellten verschiedene Methoden vor, um Wirkstoffe zu designen, die Zellbestandteile zu Phagophoren hinleiten und somit zur Zerstörung freigeben. Die Tohoku-Arbeitsgruppe konstruierte einen Stoff, der auf diese Weise den Mitochondriabbau ankurbelt, während das Fudan-Team eine Substanz entwickelte, die gezielt mutierte Huntingtinproteine der zellulären Abfallentsorgung zuführt. Letztere Strategie wird nun bei der Firma PAQ Therapeutics, einem Spin-off der Fudan-Universität, in die kommerzielle Anwendung gebracht.

Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, die schon seit Langem über Autophagie forschen, mit ihren Ideen einer medizinischen Nutzung aber nur wenig Interesse bei der Pharmaindustrie fanden, begrüßen die Aufmerksamkeit, die Arzneimittelhersteller diesem Bereich endlich schenken. Einige sind davon überzeugt, dass sich die zelluläre Müllabfuhr auf vielerlei Weise nutzen lässt – nicht zuletzt dank ausgefeilter Dosierungen der jeweiligen Arzneistoffe, um die therapeutische Wirkung zu maximieren. »Vielleicht sollte man die Autophagie nicht dauerhaft, sondern nur in regelmäßigen Abständen ankurbeln, um unerwünschte Nebenwirkungen einer zu starken Entgiftung zu vermeiden«, sagt Congcong He, Zellbiologin an der

Feinberg School of Medicine der Northwestern University in Chicago. He verfügt über noch unveröffentlichte Daten aus Mausexperimenten, die den Vorteil dieser »Weniger ist mehr«-Dosierung belegen.

Zudem scheint es Synergien zwischen verschiedenen Teilabschnitten der Autophagie zu geben. »Es könnte sich auszahlen, sowohl den Abbauprozess selbst zu aktivieren als auch das Einschleusen schadhafter Substanzen ins Autophagosom zu verbessern«, meint Herbert Virgin, wissenschaftlicher Mitbegründer von Casma Therapeutics. Das wäre so, als würde man einerseits die städtische Müllverbrennungsanlage vergrößern, andererseits aber auch mehr Müllwagen auf die Straße bringen, die den Abfall wegfahren. Vieles spricht dafür, dass alternde Zellen von einer solchen Investition in ihre Infrastruktur profitieren.

QUELLEN

Anguiano, J. et al.: Chemical modulation of chaperone-mediated autophagy by retinoic acid derivatives. *Nature Chemical Biology* 9, 2013

Bourdenx, M. et al.: Chaperone-mediated autophagy prevents collapse of the neuronal metastable proteome. *Cell* 184, 2021

Fernández, A. F. et al.: Disruption of the beclin 1-BCL2 autophagy regulatory complex promotes longevity in mice. *Nature* 558, 2018

Li, Z. et al.: Allele-selective lowering of mutant HTT protein by HTT-LC3 linker compounds. *Nature* 575, 2019

Wang, C. et al.: Enhanced autophagy in Beclin1 F121A/F121A knockin mice counteracts aging-related neural stem cell exhaustion and dysfunction. *Autophagy* 18, 2022

Dieser von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte Artikel ist Teil von »Nature Outlook: Ageing«, einer redaktionell unabhängigen Beilage, die mit finanzieller Unterstützung Dritter produziert wurde.

nature

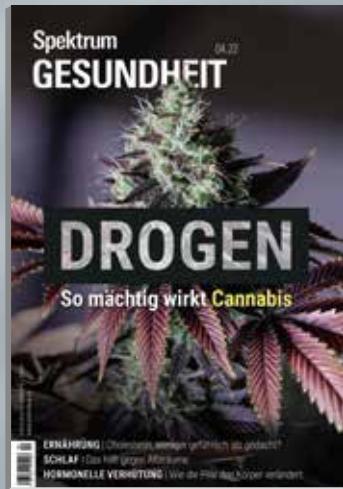
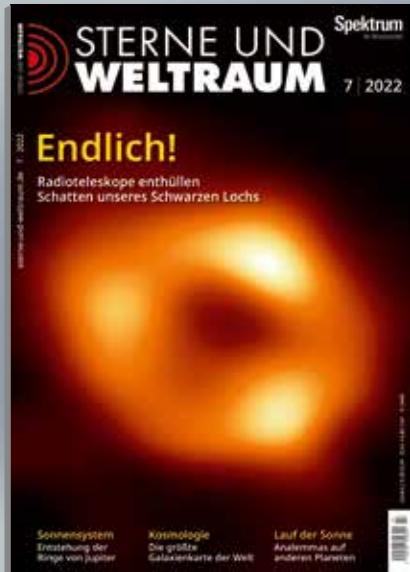
© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 601, S. S15-S17, 2022

Unsere Neuerscheinungen

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



Informationen und eine Bestellmöglichkeit
zu diesen und weiteren Neuerscheinungen:
service@spektrum.de | Tel. 06221 9126-743

Spektrum.de/aktion/neuerscheinungen



FRAZISCHADEL (WWW.FRAZISCHADEL.FRISTETTERAT/SHOW_CONTENT/PHPID=81/
CC-BY-SA 4.0 CREATIVE COMMONS BY-SA 4.0 LEGALCODE)

FREISTETTERS FORMELWELT

MATHEMATIK ALS KUNSTFORM

**Warum etwas beweisen, das bereits gezeigt wurde?
Tatsächlich geht es dabei um mehr, als nur den Wahrheitsgehalt mathematischer Sätze zu prüfen: Denn Beweise können verborgene Strukturen offenbaren.**

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

► spektrum.de/artikel/2021584

Paul Erdős (1913–1996) war einer der wichtigsten Mathematiker des 20. Jahrhunderts. Er ist nicht nur für seine fachlichen Leistungen bekannt, sondern auch für seine exzessive Kollaborationswillingkeit – und nicht zuletzt wegen seines durchaus exzentrischen Lebenswandels. Erdős lebte für die abstrakte Wissenschaft, und in den Stunden des Tages, die er nicht schlafend verbrachte, arbeitete er aufgeputscht durch Koffein und Amphetamin an etlichen verschiedenen Problemen.

Zu seinen unkonventionellen Ideen gehört etwa das so genannte »BOOK«, in dem »Gott die perfekten Beweise mathematischer Sätze aufbewahrt«. Natürlich glaubte Erdős nicht wortwörtlich an einen Schöpfer, der eine Liste mit Fachpublikationen pflegte – er zweifelte die Existenz eines göttlichen Wesens sogar an. Trotzdem stellte er sich gern ein Buch vor, »das die besten Beweise aller mathematischen Sätze enthält, Beweise, die elegant und perfekt sind«. Auch wenn er das eher scherhaft meinte, bezeichnete Erdős aber, sobald er ein besonders schönes Theorem sah, es mit Vorliebe als »straight from The BOOK«.

Erdős hat niemals ein solches Buch veröffentlicht, doch Martin Aigner und Günter Ziegler haben 1998 »Proofs from THE BOOK« herausgebracht, in dem sie 45 elegante Theoreme vorstellen. Eigentlich sollte es ein Geschenk zu Erdős' 85. Geburtstag sein – aber leider starb der Empfänger kurz vor der Fertigstellung. Das Werk gilt inzwischen als Sammlung ästhetischer mathematischer Arbeiten und enthält natürlich ebenfalls Analysen von Erdős selbst. Zum Beispiel seinen Beweis des bertrandschen Postulats, das man so zusammenfassen kann:

$$\forall n > 1 \exists p : n < p < 2n$$

In normaler Sprache formuliert lautet die Aussage: Für jede natürliche Zahl n größer als 1 existiert mindestens eine Primzahl p , die zwischen n und $2n$ liegt. Joseph Bertrand hat die Behauptung 1845 aufgestellt, die sein Kollege Pafnuti Tschebyschow sieben Jahre später allgemein bewiesen hat. Ein Jahr vor seinem Tod veröffentlichte Srinivasa Ramanujan (1887–1920) dazu einen nur zwei Seiten langen Beweis. Auch Erdős widmete sich dem längst gelösten Problem und fand eine weitere Möglichkeit, es zu belegen. Dabei stehe seine Methode, wie er in der Einleitung anmerkt, »an Einfachheit nicht hinter dem ramanujanschen Beweis«.

Das wirft die Frage auf, wieso sich Erdős, Ramanujan und die vielen anderen, die das bertrandsche Postulat ebenfalls untersucht haben, überhaupt so viel Mühe gemacht haben. Tschebyschow hat die Sache ja schon 1852 erledigt – und ein Beweis ist ein Beweis. Wenn einmal gezeigt wurde, dass eine Aussage gültig ist, dann braucht es keine weitere Bestätigung. Mathematik ist keine Naturwissenschaft, in der man Experimente wiederholen muss. Was sich korrekt aus den Regeln der Logik und den grundlegenden Axiomen ableiten lässt, ist für alle Zeiten gültig.

Ein Beweis dient aber nicht bloß dazu, die Richtigkeit einer Aussage zu belegen, er soll ebenso neue Gedanken anstoßen, um ungeahnte Verknüpfungen zwischen Gebieten zu finden und tiefer in die abstrakte Welt der Mathematik einzudringen. Deswegen kann es sich lohnen, verschiedene Pfade auszuprobieren.

Ebenso wie es in unserem Alltag einen Unterschied macht, ob man mit dem Auto über eine langweilige Autobahn fährt oder zu Fuß einen schönen Wanderweg entlangspaziert, kann man in der Mathematik verschiedene Wege einschlagen – und dabei sogar Neues entdecken. Die allerschönsten Routen sind nach Erdős' Idee im Buch von Aigner und Ziegler niedergeschrieben.

SUPERNOVAE WARTEN AUF DAS GALAKTISCHE FEUERWERK

Jederzeit könnte irgendwo in der Milchstraße ein Stern explodieren. Überall auf der Welt laufen Vorbereitungen für diesen Fall: Es braucht ständige Wachsamkeit und parat stehende Geräte, um solch ein Spektakel möglichst umfassend zu dokumentieren.

Davide Castelvecchi ist Mathematiker und als Wissenschaftsjournalist regelmäßig Autor bei »Nature«.

► spektrum.de/artikel/2021587



SUPERNOWA 1987A In der Illustration sind die vergleichsweise kühlen Überreste des Sterns rötlich dargestellt. Im Umkreis trifft die Stoßwelle der Explosion auf zuvor abgegebenes Gas und sorgt für intensive Leuchterscheinungen.

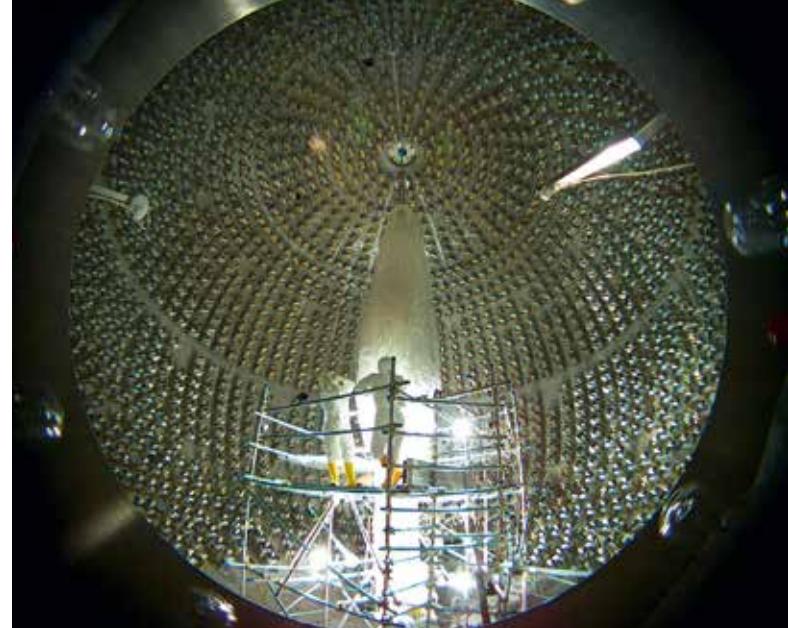
Die vergangenen drei Jahrzehnte hat Masayuki Nakahata von der Universität Tokio damit verbracht, auf die Explosion eines nahe gelegenen Sterns zu warten. Das letzte Mal ist so etwas im Februar 1987 passiert: Plötzlich erschien ein neuer Lichtpunkt am südlichen Nachthimmel. Seit Jahrhunderten war dies die erste Supernova, die Menschen direkt beobachten konnten. Unter dem Namen SN 1987A machte sie auf der ganzen Welt Schlagzeilen und hat zu weit reichenden Fortschritten in der Astrophysik geführt.

Zu jener Zeit war Nakahata Student. Er arbeitete an einem der damals weltbesten Neutrinodetektoren, dem Kamiokande-II-Detektor am Kamioka Observatory nahe der Stadt Hida in Japan. Seine Kommilitonin Keiko Hirata und er entdeckten Neutrinos, die aus der Supernova herausströmten. Es war der erste Nachweis von Neutrinos, die von außerhalb des Sonnensystems stammten.

Inzwischen ist Nakahata vorbereitet, wenn die nächste Supernova explodiert. Er leitet eines der größten Neutrinoexperimente der Welt: den Detektor Super-Kamiokande. 2021 wurden dort die Frühwarnsysteme verbessert. Dadurch können die Computer des Observatoriums fast in Echtzeit erkennen, wenn ein Signal von den Neutrinos einer Supernova stammt, und astronomische Teleskope weltweit benachrichtigen.

Auf Grund des Frühwarnsystems von Super-Kamiokande und anderen Neutrinodetektoren werden sich Robotik-Teleskope vollautomatisch in Richtung des sterbenden Sterns ausrichten, um das Licht der Supernova einzufangen – in den meisten Fällen ganz ohne menschliches Zutun. »Das dürfte dann alle ganz schön in Aufregung versetzen«, meint Alec Habig, Astrophysiker an der University of Minnesota Duluth.

Genau dieses ersehnte erste Leuchten könnte aber zu viel des Guten sein, fürchtet Patrice Bouchet. Er ist Astrophysiker an der Université Paris-Saclay und hat vom La-Silla-Observatorium in Chile aus wichtige Beobachtungen der Supernova SN 1987A angestellt. Besonders energiereiche Supernova-Explosionen könnten auf der Erde heller



BOREXINO

BOREXINO Bei dem Experiment in Italien erzeugen Neutrinos in einem großen Flüssigkeitstank (hier noch ungefüllt bei Montagearbeiten) Lichtblitze, die mit rundum montierten Detektoren registriert werden.

erscheinen als der Vollmond und sogar noch tagsüber am Himmel sichtbar sein. Das wäre allerdings für die ultra-empfindliche Sensorik professioneller Teleskope möglicherweise viel zu intensiv.

Indessen gibt es einige der Instrumente gar nicht mehr, die Bouchet für seine Beobachtungen von SN 1987A benutzen konnte. »Wenn jetzt Eta Carinae oder Betelgeuze explodieren würden, wären wir nicht in der Lage, diese Sterne so zu beobachten, wie wir das mit SN 1987A getan haben«, mahnt er. Von den beiden hellen Sternen in unserer Milchstraße ist bekannt, dass sie sich bald zu Supernovae entwickeln werden. Das könnte noch ein paar Millionen Jahre dauern. Es könnte aber auch morgen so weit sein. Deshalb werden im Fall einer Supernova die Profis alles daran setzen, ihre Ausrüstung schleunigst anzupassen. Ebenso könnte die Stunde der Amateure schlagen: Sie besitzen kleinere Teleskope und wissen oft sehr gut damit umzugehen.

Für die Wissenschaft wäre so ein Ereignis jedenfalls enorm ertragreich. Supernova-Explosionen sind unerlässlich beim Versuch zu verstehen, wie sich die chemischen Elemente, die durch Kernfusion im Inneren von Sternen hervorgehen, in ihrer galaktischen Umgebung verteilen. Darüber hinaus werden bei der Explosion selbst erst einige Elemente produziert, die sonst nirgends entstehen. Die Neutrinos, auf die Nakahata und viele andere so sehnlich warten, sollen einzigartige Einblicke in die Vorgänge eines explodierenden Sterns ermöglichen. Doch Supernovae wurden selten aus nächster Nähe beobachtet – aus moderner Zeit kennen wir nur SN 1987A.

In den ersten Stunden des 24. Februar 1987 fertigte Ian Shelton, Angestellter an einem kanadischen Teleskop in Las Campanas in Chile, Aufnahmen der Großen Magellanschen Wolke an. Diese Satellitengalaxie der Milchstraße ist am südlichen Himmel zu sehen. Darauf entdeckte er einen neuen, leuchtenden Punkt. Shelton erkannte sofort die

AUF EINEN BLICK LICHTSHOW OHNE ANKÜNDIGUNG

1 Bei einer Supernova blitzt ein Stern am Ende seines Lebenszyklus urplötzlich auf. Das letzte Mal ließ sich so etwas 1987 aus der Nähe betrachten.

2 Seither haben Observatorien ihre Messmethoden verfeinert und globale Warnnetzwerke eingerichtet. Damit wäre ein solches Ereignis vor allem in den entscheidenden ersten Momenten gut zu erfassen.

3 Schon morgen könnte ein Stern in unserer Galaxis explodieren – oder erst in Jahrzehnten. Bis dahin werden die Instrumente und Pläne für den Ernstfall ständig verbessert.

potenzielle Bedeutung, ging ins Freie und sah selbst nach. Tatsächlich identifizierte er am Nachthimmel einen hellen Stern, der vorher nicht da gewesen war. Seit 1604 war es das erste Mal, dass wieder eine Supernova am Himmel mit bloßem Auge sichtbar war.

Supernovae gehören zu den energiereichsten Ereignissen in unserem Kosmos. Sie flammen wochen- oder sogar monatelang hell auf, und in seltenen Fällen strahlen sie dabei mehr Licht ab als eine ganze Galaxie. Supernova ist allerdings nicht gleich Supernova. Es gibt mehrere Arten (siehe »Typen von Supernovae«), wobei die häufigste am Ende der Entwicklung eines Sterns auftritt, der es auf 8 bis 140 Sonnenmassen bringt.

Geht einem solchen Himmelskörper der Brennstoff für die Kernfusion aus, bleibt in seinem Mittelpunkt ein zu weiteren Verschmelzungen unfähiges Plasma aus Nickel und Eisen zurück. Die äußeren Schichten stürzen gen Zentrum. Unterdessen beginnt der Kern zu kollabieren. Innerhalb von Millisekunden wird hier ein Großteil der Materie zusammengequetscht und vereint Protonen und Elektronen zu Neutronen. Damit steigt die Dichte des Kerns schlagartig um mehrere Größenordnungen, denn Neutronen beanspruchen viel weniger Platz als Plasma. Sie bilden einen so kompakten Ball, wie es die Gesetze der Physik eben noch zulassen. Alec Habig bezeichnet das daraus hervorgehende Gebilde als Proto-Neutronenstern.

Ein Inferno, dem nur die Neutrinos schnell entkommen

Jedes Mal, wenn ein Neutron entsteht, wird ein Neutrino freigesetzt. Deshalb geht der Kernkollaps anfangs mit einem intensiven Schauer jener Elementarteilchen einher. Tatsächlich hat die Katastrophe aber gerade erst begonnen. »Jetzt regnet der restliche Stern auf den Proto-Neutronenstern regelrecht herab«, schildert Habig. Die Materie stürzt mehrere tausend Kilometer gen Zentrum und trifft nach dieser dramatischen Beschleunigungsphase auf die harte Oberfläche des Kerns aus Neutronen. Sie prallt abrupt als Stoßwelle zurück, wird heftig nach außen geschleudert und reißt den Rest des Sterns völlig auseinander. Das einsame Überbleibsel ist ein Neutronenstern, der es auf rund die doppelte Sonnenmasse bringt.

Während des Kollapses prallen ständig Elementarteilchen aufeinander, ähnlich wie in einem Beschleuniger auf der Erde. Wegen der enormen Energien entstehen alle möglichen neuen Teilchen. »Da ist es so heiß und so dicht, dass praktisch alles passiert«, sagt Kate Scholberg, Astrophysikerin an der Duke University in Durham, North Carolina. Weil alles auf so engem Raum stattfindet, können die allermeisten der Teilchen einander nicht ausweichen. Sie sind in dem Inferno vorerst eingesperrt – mit einer Ausnahme. Erzeugt eine Teilchenkollision ein Neutrino, hat dieses gute Chancen, sich seinen Weg hinaus ins All zu bahnen, ohne dabei aufgehalten zu werden. Das ist das Besondere an Neutrinos: Sie wechselwirken kaum mit jedweder Materie. Infolgedessen entkommen über einen Zeitraum von rund zehn Sekunden Unmengen von ihnen. Schätzungen zufolge hat SN 1987A rund 10^{58} Neutrinos freigesetzt. Auf dieser Zeitskala strahlt die Supernova etwa 99 Prozent ihrer

Energie in Form von Neutrinos ab. Die Partikel entfliehen sofort und fast mit Lichtgeschwindigkeit. Deswegen eignen sich Neutrinos als unmittelbare Zeugen des Kernkollapses so wunderbar als eine Art Frühwarnsystem. Die Stoßwelle braucht hingegen viele Stunden, um die äußeren Schichten des Sterns zu durchdringen. Erst dann wird die Supernova als solche sichtbar.

Während im Zentrum des Geschehens ein Neutronenstern zurückbleibt, verteilt sich der größte Teil der Materie im interstellaren Raum. Über die nachfolgenden Äonen wird sie die Entstehung neuer Sterne und ihrer Planeten anstoßen. Nach einem solchen Ereignis könnte vor etwa fünf Milliarden Jahren unser eigenes Sonnensystem hervorgegangen sein.

Schätzungen von 2021 zufolge sollte es in der Milchstraße durchschnittlich ein bis zwei derartige Kernkollaps-Supernovae pro Jahrhundert geben. Da SN 1987A in einer Satellitengalaxie explodierte und die letzte Supernova in der

Typen von Supernovae

Sterne explodieren auf verschiedene Arten. Eine erste grobe Differenzierung entstand historisch wegen der Eigenheiten des ausgesandten Lichts: Supernovae vom »Typ I« enthalten keine Spektrallinie von Wasserstoff, beim »Typ II« ist sie hingegen zu sehen. Weitere Unterteilungen reflektieren zusätzliche beobachtbare Details und entsprechen einer Vielzahl hypothetischer Mechanismen, die hinter dem Ende eines Sterns stecken können.

Art und Ursache

Typ Ia Ein Weißer Zwerg (das Endstadium eines Sterns etwa wie unserer Sonne) zieht zusätzliches Material von einem Begleiter ab. Das destabilisiert ihn und verursacht eine Explosion.

Typ Ib Kernkollaps eines Sterns, der zuvor seine äußere Hülle aus Wasserstoff verloren hat

Typ Ic Wie Typ Ib, nur wurde dem Stern mehr Material entrissen: Ihm fehlt zusätzlich seine Schicht aus Helium.

Typ II Bei einem schnellen Kernkollaps kann nichts dem Druck der nach innen stürzenden Materie entgegenwirken, bis sie auf die Dichte eines Atomkerns zusammengepresst ist. Auch bei Typ II gibt es mehrere Unterarten. Sie unterscheiden sich dadurch, wie die abgestoßenen Hüllen mit der Umgebung und der ausgesandten Strahlung interagieren. Das wirkt sich auf die Lichtkurve aus, die wir auf der Erde messen.

Milchstraße 1604 beobachtet wurde, sollte man meinen, eigentlich müsste es bald wieder so weit sein. Aller Statistik zum Trotz wurden in der schriftlich überlieferten Geschichte der Menschheit nur fünf Supernovae mit bloßem Auge gesehen. Von diesen sind lediglich zwei auf Kernkollaps-Supernovae zurückzuführen.

Für die Diskrepanz zur theoretischen Erwartung gibt es verschiedene Gründe. Wenn sich genug Materie in einem kollabierenden Kern ansammelt, kann dieser beispielsweise zu einem Schwarzen Loch werden. Damit wäre die Lightshow vorzeitig abgesagt. Aber selbst, wenn es in den meisten Fällen zu einer echten Explosion kommt, merken wir davon immer noch nicht zwangsläufig etwas. Massereiche Sterne liegen nämlich vorzugsweise in der Ebene der Milchstraße, und dort befindet sich interstellarer Staub, der das Licht auf dem Weg zu uns verschluckt.

Neutrinos ist egal, ob sie auf ihrer Route das galaktische Zentrum passieren – mit Staub wechselwirken sie ebenso wenig wie mit anderen Teilchen. Mit irdischen Neutrino-detektoren könnten wir so von Supernovae erfahren, die auf andere Weise nicht zu entdecken sind.

1987 war Kamiokande-II einer der größten Neutrino-detektoren der Welt. Mit 3000 Tonnen Wasser fing er seinerzeit insgesamt elf Neutrinos der Supernova ein. Auch Experimente in Ohio und in Russland erbeuteten einige Teilchen. Sollte heute ein ähnliches Ereignis auftreten, könnte der 1996 gestartete Detektor Super-Kamiokande mit seinen 50000 Tonnen Wasser wohl rund 300 Neutrinos registrieren. Diese Zahl wäre bei einer Supernova innerhalb unserer eigenen Galaxie statt in der Großen Magellanschen Wolke womöglich noch höher.

Ab 2018 erhielt das kurz Super-K genannte Observatorium ein Upgrade, das seine Fähigkeiten in Bezug auf die Untersuchung von Supernovae erheblich verbesserte. Unter anderem fügte die Super-K-Kollaboration, an der japanische und US-amerikanische Physikerinnen und Physiker beteiligt sind, dem Wasser im Detektor das Element Gadolinium hinzu. Dadurch kann der Detektor zwischen zwei verschiedenen Arten von Supernova-Neutrinos unterscheiden. Ein Typ erzeugt Licht, das sich im Detektor in eine zufällige Richtung ausbreitet. Beim anderen Typ von Neutrino weisen die Blitze zum Ursprung des Neutrinos. Damit kann die Software sehr schnell berechnen, wo ungefähr am Himmel die Supernova explodiert sein müsste. Das reicht, um die Teleskope am Himmel mit einer Genauigkeit von rund drei Grad auf das Ziel auszurichten. »Super-K ist der weltweit beste Detektor, um die Richtung einer Supernova zu bestimmen«, bekräftigt Nakahata.

Das Supernova-Warnsystem namens SNWatch informiert hochrangige Kollaborationsmitglieder über eine mögliche Sichtung. Gleichzeitig ertönt in der unterirdischen Halle und im Kontrollraum des Detektors ein Alarm. Sara Sussman, inzwischen Physikerin an der Princeton University, arbeitete 2017 während ihres Studiums am Super-K und erlebte dort persönlich einen derartigen Alarm. Er ging bei ihrer ersten Schicht im Kontrollraum los – und Sussman wusste nicht, dass es sich dabei um eine Übung handelte. »Diesen Moment werde ich mein Leben lang nicht vergessen«, erinnert sie sich.

Ursprünglich sah das Prozedere vor, beim Auftreten einer potenziellen Supernova eine Notfallsitzung abzuhalten, bei der ein hochrangiges Team beratschlagen sollte, ob das Signal ernst zu nehmen und eine Meldung an den Rest der Welt zu machen sei. Seit Dezember 2021 sind menschliche Eingriffe und Entscheidungen nicht mehr nötig. Im Fall eines Neutrinoschauers veröffentlicht SNWatch innerhalb von fünf Minuten eine automatische Warnung inklusive Himmelskoordinaten, sagt Nakahata. Er hofft, mit künftigen Verbesserungen den Zeitraum auf eine Minute zu reduzieren.

Weltumspannendes Warnsystem

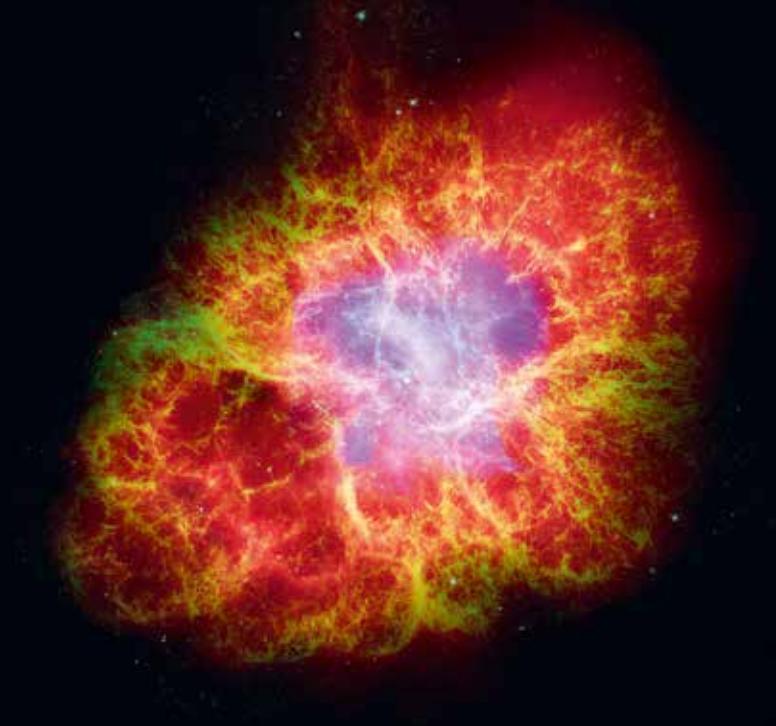
Im Ernstfall würde jetzt also alles anders laufen als 1987. Damals gab es auf dem chilenischen Berg, auf dem Ian Shelton die Supernova mit bloßem Auge gesehen hatte, noch nicht einmal eine Telefonleitung, lediglich Funk. Selbst der funktionierte nur selten. Um den Rest der Welt auf die gerade am Himmel aufgetauchte Supernova aufmerksam zu machen, musste Personal des Observatoriums zwei Stunden in die nächstgelegene Stadt fahren und von dort ein Telegramm losschicken.

Neutrino-Frühwarnsysteme für Supernovae sind keine neue Erfindung. Seit knapp zwei Jahrzehnten gibt es das Supernova Early Warning System, kurz SNEWS. An dem Netzwerk sind Super-K und mehrere andere Neutrino-Observatorien beteiligt, unter anderem IceCube in der Antarktis sowie Borexino in Italien. Große Anlagen, die in den Vereinigten Staaten und in China gebaut werden, sollen dazukommen. Gleichzeitig baut Japan den Hyper-Kamio-

SUPERNOWA-ÜBERREST Aus vielen Ländern der Welt gibt es Überlieferungen eines Lichtflecks, der 1006 am Himmel erschienen ist. An der Stelle des kosmischen Ereignisses, das vermutlich von der Verschmelzung zweier Weißen Zwerge ausgelöst wurde, lässt sich heute ein leuchtender Nebel beobachten.



RADIO: NAOJ/AUSTRALIAN TELESCOPE TEAM; X-RAY: CHANDRA X-RAY OBSERVATORY/NASA/CXC/G. MADDALENA & CORNWEIL; RÖNTGEN: M. MADALENA & CORNWELL; RÖNTGEN: CASSIUS-CHEM. J. HUGUES ET AL.; SICHTBARE LICHT: 0,3-METRE CURTIS SCHMIDT OPTICAL TELESCOPE / MASTADORN/ESO; DIGITIZED SKY SURVEY (WWW.SDSS.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES) COLLAGE: WINKLER AND DIGITIZED SKY SURVEY (WWW.SDSS.ORG/LICENSES/DR7/0/LEBADCODE) ESO 10881 / CC BY 4.0 (C) ESO/SDSS DR7/0 (EBC/ACODE)



RÖNTGEN: NASA/CXC/HESTER; ASYL; OPTISCHE: NASA/STScI/HESTER & A. ZELENINA;
LILA: ASYL; INFRAROT: NASA/JPL-Caltech/IRAP/Minna

KREBSNEBEL 1054 wurde eine Supernova beobachtet, bei der ein Stern zu einem Neutronenstern wurde. Dieser sowie seine spektakulär leuchtende Umgebung zählen zu den bekanntesten Überresten einer Supernova innerhalb der Milchstraße.

kande, der fünfmal größer sein wird als Super-K. »Dann erwarten wir bis zu 90 000 Neutrinos, wenn eine Supernova im Zentrum der Galaxie explodiert«, hofft Francesca Di Lodovico, Sprecherin des Detektors.

Die Idee hinter SNEWS ist es, Daten von verschiedenen Orten zu kombinieren. Das würde das Vertrauen darauf erhöhen, eine Entdeckung gemacht zu haben, selbst wenn ein einzelnes Signal als zu schwach erscheint. An jedem Detektor gibt es eine Software, die einen zentralen SNEWS-Server über ungewöhnliche Vorkommnisse informiert. Er sendet nur dann eine Warnung, wenn zwei Detektoren an zwei unterschiedlichen Positionen auf der Erde innerhalb von zehn Sekunden verdächtige Neutrinos registrieren. Laut Habig wäre es extrem unwahrscheinlich, dass nahezu gleichzeitige Signale beispielsweise in Japan und in Italien beide auf Zufall beruhen.

Scholberg und Habig haben in den 1990er Jahren mit der Arbeit an SNEWS begonnen. SN 1987A hatte deutlich gemacht, wie wichtig es ist, Warnungen zu Supernovae schnell zu versenden. Zum damaligen Zeitpunkt gab es für Kamiokande-II kein System, das die Menge an eingefangenem Teilchen live meldete. Nakahata und Hirata mussten nachträglich nach Neutrinos von SN 1987A suchen. Dafür druckten sie die Rohdaten des Detektors von mehreren Tagen auf Endlospapier aus und durchsuchten den Stapel, bis sie schließlich die elf charakteristischen Neutrinos fanden.

SNEWS ist seit 2005 aktiv. Doch seitdem hat es keine einzige Warnung verschickt. »Man muss die Hartnäckigkeit und die Ausdauer der Beteiligten einfach bewundern«, meint Robert Kirshner, Astronom an der Harvard University. »Sie wissen, dass sie richtigliegen. Sie wissen, dass ihre

Arbeit wichtig ist. Aber sie werden dafür nicht gerade belohnt.«

Ein erstes großes Upgrade namens SNEWS 2.0 soll Meldungen auf Grundlage von vielleicht weniger zuverlässigen Einzelbeobachtungen erzeugen. Früher waren Observatorien eher zurückhaltend, wenn es darum ging, Warnungen zu versenden. Das sollte das Risiko von Fehlalarmen ausschließen. Doch die Forschungskultur hat sich geändert, und die Fachleute trauen sich inzwischen, einander selbst bei nicht ganz so gut gesicherter Datenlage zu informieren. Nur für den Fall der Fälle. »Die Einstellung hat sich da um 180 Grad gedreht«, resümiert Habig. Das mag teilweise mit den Entwicklungen in der Gravitationswellenastronomie zu tun haben. Sie liefert wöchentlich und manchmal täglich Signale, denen anschließend konventionelle Teleskope nachspüren. So lässt sich dasselbe Ereignis anhand verschiedener astronomischer Phänomene verfolgen. Das wird als Multi-Messenger-Astronomie bezeichnet.

Eine weitere Neuerung von SNEWS 2.0 besteht darin, auf Basis der Aufzeichnungen mehrerer Observatorien zum selben Neutrinoschauer die genauen Zeitpunkte der Ankunft miteinander zu vergleichen. Mit den Informationen lässt sich auf die Position der Quelle am Himmel schließen. Eine derartige Ortung wäre zwar ungenauer als die des Neutrindetektors Super-K. Dafür könnte die Triangulation Habig zufolge schneller sein.

Als Ian Shelton die Supernova SN 1987A in Chile entdeckte, war Patrice Bouchet zur richtigen Zeit am richtigen Ort. Er arbeitete an der Europäischen Südsternwarte in La Silla, wo er ein spezielles Gerät benutzte, das auch tagsüber das Infrarotlicht von Sternen erkannte. Somit konnte Bouchet die Helligkeit der Supernova selbst dann noch dokumentieren, als die Sonne den Himmel überstrahlte. Allerdings ist das damals von Bouchet verwendete Teleskop inzwischen außer Betrieb. Kein modernes Observatorium verfügt über die passende Ausrüstung für derartige Infrarotmessungen.

Bouchet meint, schlimmer sei sogar noch, dass die meisten großen Observatorien ihre kleineren Teleskope für sichtbares Licht inzwischen eingemottet haben. Die Standorte konzentrieren sich auf die größten und empfindlichsten Instrumente. Gerade diese sind für die Beobachtung eines hellen Ereignisses wie einer Supernova nutzlos.

Flexible und einfallsreiche Datensammlung

Danny Steeghs, Astronom an der University of Warwick, ist da optimistischer. Er spricht von einer Renaissance der »kleinen Astronomie«, teilweise angetrieben von der Multi-Messenger-Astronomie. »Inzwischen haben wir eine neue Generation maßgeschneiderter Teleskope. Wenn eine Supernova auftaucht, verpassen wir vielleicht die allererste Phase. Aber sicher werden alle kreativ reagieren.« Steeghs betreibt mit dem Gravitational Wave Optical Transient Observer ein System, das rasch große Teile des Himmels anvisieren kann, um mögliches Licht im Zusammenhang mit Gravitationswellen aufzuspüren. Andy Howell vom Las Cumbres Observatory glaubt das ebenfalls: »Selbst im Fall eines wirklich hellen Sterns sind alle Beteiligten schlau und werden einen Weg finden.« Las Cumbres ist eine Organisa-



ESO (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESO0708A) / CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS ORIGIN) / LICENSE BY A (WIKICOMMONS)

AUFNAHME VON 1987 Der explodierende Stern war mit bloßem Auge zu sehen und zeigte sich in Teleskopbildern wie diesem als hell leuchtendes Objekt.

tion mit Sitz in der Nähe von Santa Barbara in Kalifornien. Sie betreibt ein Netzwerk von vollautomatischen Teleskopen, die zusammen den gesamten Himmel abdecken. »Wir könnten eine Supernova rund um die Uhr verfolgen, weil bei irgendeinem unserer Teleskope immer Nacht ist.«

Mit einigen Tricks ließen sich selbst außergewöhnlich leuchtkräftige Objekte beobachten, etwa mit besonders kurzen Belichtungszeiten oder teilweise abgedunkelten Spiegeln. Bei einer entscheidenden Datenreihe wird es schwieriger, nämlich der Messung der Helligkeit der Supernova sowie ihrer Entwicklung im Lauf der Zeit. Denn die Helligkeit eines Sterns wird normalerweise durch den Vergleich mit einem anderen, bekannten Objekt im selben Sichtfeld erfasst. So eine Kalibrierung ist jedoch schwer zu bewerkstelligen, wenn eine Supernova alles überstrahlt und kein weiterer Stern in der Aufnahme mehr zu sehen ist.

Viele Hoffnungen ruhen hierbei auf Hobbyastronomen und -astronominnen. Bei deren Koordinierung hilft etwa die American Association of Variable Star Observers (AAVSO) mit Sitz in Cambridge, Massachusetts. »Sie wären voll dabei – manche von ihnen innerhalb von Minuten«, so Elizabeth Waagen. Die Astronomin gehört seit mehr als 40 Jahren zum Team der AAVSO. »Wir sind überall«, pflichtet

Arto Oksanen bei. Oksanen ist ein IT-Experte aus Jyväskylä in Finnland und in der Welt der Amateurastronomie eine Berühmtheit. »Zu jeder Zeit gibt es jemanden mit klarem Himmel über sich.« Oksanen ist Vorsitzender eines Vereins, der etwa 300 Kilometer nördlich von Helsinki ein eigenes ferngesteuertes Observatorium mit einem 40-Zentimeter-Spiegelteleskop und einer automatischen Kuppel gebaut hat und betreibt. Für eine sehr helle Supernova reichen sogar kleinere Teleskope aus. Oksanen berichtet, wenn das Objekt sehr leuchtkräftig und am finnischen Himmel sichtbar sei, würde er zunächst Bilder davon mit seiner digitalen Spiegelreflexkamera machen. Selbst eine so simple Methode lieferte unschätzbare Informationen darüber, wie sich die Helligkeit einer Explosion ändert. Allerdings mahnt Tom Calderwood, ein Amateurastronom in Bend, Oregon, nur wenige Amateure hätten Notfallpläne erstellt, um sich auf eine mögliche Supernova vorzubereiten: »Es wäre lohnenswert für die Community, sich hinzusetzen und sich zu überlegen, was zu tun wäre.«

Die Supernova von 1987 veränderte das Leben etlicher Menschen. Shelton beschloss, auf dem Gebiet der Astronomie zu promovieren. Bouchet verbrachte einen Großteil des darauf folgenden Jahres auf dem chilenischen Berg und studiert seitdem die Supernova und ihren Überrest. Das Gleiche gilt für Kirshner, der an der Suche nach dem übrig gebliebenen Neutronenstern von SN 1987A beteiligt war. Die Untersuchungen könnten mit dem im Dezember 2021 gestarteten James-Webb-Weltraumteleskop weitergehen. Das JWST würde Infrarotstrahlung aufspüren, die sich ihren Weg durch die Staubschichten um die ehemalige Supernova herum gebahnt hat. Der damalige Vorgesetzte von Nakahata, der 2020 verstorbene Masatoshi Koshiba, erhielt 2002 den Nobelpreis für Physik für seine Arbeit mit Kamio-kande-II und für die Entdeckung der elf Neutrinos.

Viele können den Zeitpunkt, an dem sie sich für die Astronomie oder die Wissenschaft im Allgemeinen zu interessieren begonnen haben, bis zu einem ganz bestimmten Tag zurückverfolgen. Oft sei es ein Tag gewesen, so Elizabeth Waagen, an dem »ein spektakuläres Ereignis ihre Fantasie beflog und den Lauf ihres Lebens veränderte«. Auch die nächste Supernova dürfte viele Schicksale prägen. »Es wird die Menschen auf ganz neue Art und Weise mit dem Himmel verbinden.« ▶

QUELLEN

Al Kharusi, S. et al.: SNEWS 2.0: A next-generation supernova early warning system for multi-messenger astronomy. *New Journal of Physics* 23, 2021

Murphy, C.T. et al.: Witnessing history: Sky distribution, detectability, and rates of naked-eye Milky Way supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 507, 2021

Rozwadowska, K. et al.: On the rate of core collapse supernovae in the milky way. *New Astronomy* 83, 2021

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 602, S. 562–565, 2022



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 3.400 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

www.academia-net.org

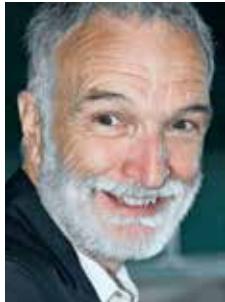
Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

SCHLICHTING! DER RASENDE KNOTEN

Aus einer Schraubenfeder lässt sich ein einfacher Knoten schnüren. Diesen kann man entlang eines Stabs rollen lassen, was eine faszinierende dreidimensionale Drehbewegung hervorbringt.



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/2021590



H. JOACHIM SCHLICHTING

VALETT-KNOTEN

In der Mitte der Schraubenfeder, die in sich verdreht und an den Enden verschweißt ist, erkennt man ein dreieckiges Loch. Durch dieses kann ein Stab geführt werden.

**Du selbst entwirre dies, nicht ich:
Ein zu verschlungener Knoten ist's für mich**

William Shakespeare (1564–1616)

► Der Hauptzweck von Knoten besteht darin, etwas zu fixieren. Damit sichern sie paradoxerweise in vielen Bereichen des Lebens unsere Fortbewegung, ob beim Schnüren von Schuhen (»Spektrum« Juli 2017, S. 70), beim Segeln oder beim Bergsteigen. Selbst unsere Kleidung würde ohne sie auseinanderfallen. Nicht nur praktisch, auch theoretisch sind Knoten bedeutsam und bilden sogar ein Forschungsgebiet in der Mathematik. Während wir im Alltag eher Knoten mit offenen Enden verwenden, hat man es bei ihren mathematischen Gegenstücken mit sich geschlossenen Schnüren zu tun.

So entsteht der einfache Überhandknoten, indem man die beiden Enden eines Seils umeinander windet und dann festzieht. Das kann jedes Kind. Solche Knoten werden erst dadurch mathematisch, dass man die freien Enden gedanklich miteinander verschmilzt (siehe »Überhandknoten«).

Knoten sind dreidimensional, auch wenn es normalerweise kaum ins Auge fällt. Denn die Schwerkraft lässt die meist schlaffen Fäden zu platten Gebilden zusammensinken. Der niederländische Grafiker M. C. Escher (1898–1972) hat sich damit beispielsweise in seinem Druck »Knoten« (1965) auseinandergesetzt und einfache Verschlingungen durch prägnante Schattierungen und Strukturierungen wieder erhaben erscheinen lassen. Andere Künstler haben Knoten gleich mit festen Materialien wie Metall und Stein als dreidimensionale Objekte gestaltet; im öffentlichen Raum finden sich viele ästhetisch ansprechende Umsetzungen. Notgedrungen geht bei den starren Werken die Funktion und Beweglichkeit üblicher Kordeln verloren. Doch das muss nicht jedes Mal so sein.

Angeregt durch den Escher-Knoten hat der deutsche Künstler Jochen Valett (1922–2014) nach eigenem Bekunden versucht, den eingefrorenen Versionen simpler Knoten nicht nur ihre naturgemäße Flexibilität zurückzugeben, sondern sie sogar zum Laufen zu bringen. Das ist ihm in Form seines »rasenden Knotens« auf eindrucksvolle Weise gelungen. Dazu verwendete er an Stelle eines Seils eine relativ weiche Schraubenfeder aus Stahldraht,

verknöte sie und verschweißte die beiden Enden miteinander. Die Feder gibt dem Knoten einerseits ein Volumen, das in gewissen Grenzen dehnbar ist und stellt andererseits sicher, dass er nicht in sich zusammenfällt (siehe »Valett-Knoten«).

Das Besondere am rasenden Knoten besteht darin, dass man ihn an einem Stab hinabrollen lassen kann. Dazu wird er mit seinem zentralen Loch stramm, also ein wenig gedehnt, über einen passenden runden Querschnitt geschoben. Damit der Knoten nicht einfach gerade herunterrutscht, muss die Dehnung eine genügend große Haftreibungskraft hervorrufen. Sie kompensiert das Gewicht der Stahlfeder. Gibt man dieser nun einen kleinen Schubs, so bewegt sie sich spiralförmig drehend am Stab hinab.

Das wird durch die Form der Öffnung möglich, die von den drei innen liegenden Abschnitten gebildet wird. Die Tangenten in den Berührungs punkten der Knotenstränge sind schräg ausgerichtet und wirken wie eine Art Schraubengewinde.

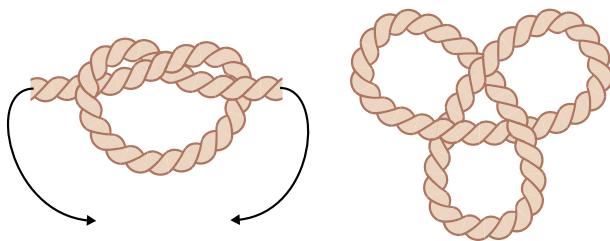
Im Unterschied zu einer Mutter auf einer Gewindestange hat man es hier jedoch nicht mit einer Gleit-, sondern mit einer echten Rollbewegung zu tun. Das heißt, wie bei Laufrädern eines Fahrzeugs legt der Punkt, mit dem die

H. JOACHIM SCHLICHTING

MOMENTAUFNAHME Der Knoten rotiert an einem Holzstab (oben) und an einem Ring (unten) hinab.



H. JOACHIM SCHLICHTING



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE ZEITZ

ÜBERHANDKNOTEN Im Alltag hat eine einfache Verschlingung offene Enden (links), die mathematische Version ist geschlossen (rechts).

Rolle jeweils auf dem Untergrund sitzt, mit jeder Umdrehung eine Wegstrecke zurück, die der Länge des Umfangs entspricht. Ein normales Rad befindet sich stets nur an einer Stelle auf der Unterlage. Der verwundete Knoten hingegen berührt den Stab an drei verschiedenen Orten. Er rollt also gewissermaßen auf drei Fahrspuren gleichzeitig hinab.

Aus der Rollbewegung des Knotens ergibt sich zwangsläufig, dass er kein starres Gebilde sein kann. Er behält zwar seine äußere Gestalt und scheint während der Rotation als Ganzes in sich zu ruhen. In Wirklichkeit schlängelt sich allerdings das Band des Knotens sozusagen durch seine eigene Form hindurch. Markiert man auf dem abrollenden Knoten einen Punkt, kann man verfolgen, wie sich dieser zyklisch umherwindet.

Der Antrieb des Ganzen ist die Gewichtskraft des Knotens. Bei einem geraden Stab endet das Herabschrauben am Boden. Eine andauernde Bewegung erreicht man, indem man als Führung stattdessen einen großen Ring passender Dicke verwendet. Der Reifen wird dann so schnell in Gegenrichtung zum abrollenden Knoten gedreht wie Letzterer an Höhe verliert (siehe »Momentaufnahme«).

Mit der Höhe des Knotens am gebogenen Ring ändert sich auch seine Achsenrichtung. Dementsprechend kommt jeweils nur eine mehr oder weniger große Komponente der Schwerkraft zur Geltung. Von deren voller Wirkung profitiert der Knoten lediglich dann, wenn die Rotationsachse senkrecht ausgerichtet ist, er also in waagerechter Lage rotiert. Hier erreicht er die größte Drehgeschwindigkeit.

Um ihn in der Position zu halten, muss der Ring entsprechend rasch in die entgegengesetzte Richtung gedreht werden. Sonst sinkt der Knoten in eine tiefere Stellung.

Weil seine Achse weiter unten am Reifen allmählich schräg kippt, nehmen daraufhin die Antriebskraft und damit die Geschwindigkeit des Knotens ab. Es stellt sich eine neue Höhe am Ring ein, bei der die Kräfte wieder gleich groß sind. Wegen dieser Rückkopplung hält sich das ganze Kunstwerk in einem fesselnden dynamischen Gleichgewicht.



PERWOMAJSK In der ukrainischen Stadt in der Oblast Luhansk ist der Krieg deutlich sichtbar.

OPEN-SOURCE- INTELLIGENCE AUF DIGITALER SPURENSUCHE

Smartphones als Zeitzeugen für Kriegsverbrechen: Dank einer immer besseren Vernetzung erreicht uns täglich eine Flut aus Daten. Aber woher weiß man, ob das Gezeigte wahr ist? Onlineermittler haben ausgeklügelte Tricks entwickelt, um die Inhalte zu prüfen – und so erstaunliche Wahrheiten ans Licht gebracht.



MAXIMILIAN CLARKE / GETTY IMAGES / ISTOCK



Manon Bischoff ist Physikerin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

► spektrum.de/artikel/2021593

► Marie Colvin war für ihre unerschrockene Berichterstattung bekannt. 1999 begab sich die damals 43-jährige Journalistin nach Osttimor, als indonesische Milizen nach einem Unabhängigkeitsreferendum eine Gewaltwelle auslösten, durch die tausende Menschen starben. Anders als ihre Kolleginnen und Kollegen vor Ort weigerte sie sich, das von proindonesischen Angreifern belagerte Gelände der Vereinten Nationen zu verlassen. Durch ihren Widerstand lenkte sie die internationale Aufmerksamkeit auf die Notlage von 1500 eingekesselten Frauen und Kindern, die daraufhin gerettet wurden. Zwei Jahre später verlor Colvin auf Sri Lanka während des dort tobenden Bürgerkriegs ihr linkes Auge: Als sie das Rebellengebiet der Tamilen durchquerte, griff die Armee mit Panzerabwehraketen an; ein Schrapnell traf ihren Kopf.

Trotz all der erschütternden Ereignisse, welche die Kriegsberichterstatterin erlebt hatte, beschrieb sie den 2011 ausgebrochenen Bürgerkrieg in Syrien als den schlimmsten Konflikt, dem sie je beigewohnt habe. Das Assad-Regime hatte ausländischen Journalisten zwar die Einreise verboten, doch Colvin schaffte es im Februar 2012, das Land heimlich auf einem Motorrad bis zur Stadt Homs zu durchqueren, wo damals heftige Kämpfe stattfanden. »Es ist eine Lüge, dass sie nur hinter Terroristen her sind. Die syrische Armee beschließt eine Stadt mit hungernden Zivilisten«, so die Worte in einem ihrer letzten Berichte. Kurz darauf, am 22. Februar, beschoss das Militär das provisorische Medienzentrum, in dem sich die Journalistin und andere Pressevertreter befanden. Colvin und der damals 28-jährige Fotожournalist Rémi Ochlik kamen ums Leben.

»Mein Job ist es, Zeugin zu sein«

Dieses und weitere schockierende Ereignisse, wie die Entführung des britischen Journalisten James Foley im November 2012, den Anhänger des selbsternannten »Islamischen Staats« zwei Jahre später vor laufenden Kameras köpften, führten dazu, dass ausländische Medien ihre Korrespondenten aus Konfliktregionen abzogen. Man konnte deren Sicherheit nicht mehr gewähren. Das war ein herber Schlag für die unabhängige Berichterstattung. »Mein Job ist es, Zeugin zu sein«, so ein berühmtes Zitat von Colvin. Doch wer übernimmt diese Aufgabe, wenn die Lage vor Ort zu gefährlich wird? Im Januar 2014 gaben die Vereinten Nationen bekannt, nicht länger die Menge an getöteten Personen (deren Anzahl damals bereits 200 000 übertraf) in dem Konflikt zählen zu können, weil sie keinen Zugang mehr zu verlässlichen Informationen hatten.

Leider ist das während kriegerischer Handlungen weniger ein Einzelfall als vielmehr die Regel. Viele Gräueltaten kommen meist erst später ans Licht, wie das Massaker in

der syrischen Stadt Hama im Jahr 1982. Damals ließ der amtierende Präsident Hafez al-Assad (der Vater des jetzigen Herrschers Bashar al-Assads) den Aufstand der dortigen Muslimbruderschaft äußerst brutal niederschlagen, wobei tausende Zivilisten getötet und große Teile der Stadt zerstört wurden. Bis heute variieren die Opferzahlen zwischen 2000 und 40 000 Toten. Ohne verlässliche Quelle vor Ort ist es so gut wie unmöglich, herauszufinden, was damals genau geschah. Und damit bleibt das ultimative Ziel der Kriegsberichterstattung auf der Strecke: Verbrechen offenzulegen, in der Hoffnung, dass sich die Täter für ihre Handlungen verantworten müssen.

Angesichts des 2022 ausgebrochenen Kriegs in der Ukraine ist diese Thematik wieder in den Fokus gerückt. Was die Informationsdichte angeht, unterscheiden sich die heutigen Konflikte deutlich von jenen in der Vergangenheit. Denn der Arabische Frühling hat eine Zeitenwende in der Berichterstattung eingeleitet: In den 2010er Jahren besaßen zahlreiche Syrer ein Smartphone mit Internetzugang – und scheuten sich nicht, davon Gebrauch zu machen. Erstmals gelangen somit enorm viele Informationen aus erster Hand und ungefiltert nach draußen. In den sozialen Medien stieß man täglich auf zahllose Fotos und Videos, welche die schrecklichen Ereignisse dokumentierten.

Einerseits eröffnete das ungeahnte Möglichkeiten für Journalistinnen und Journalisten, um die Lage vor Ort einzuschätzen, ohne sich selbst in Gefahr zu begeben. Andererseits stellte das die Medien, die fundiert und unabhängig berichten möchten, vor eine Herausforderung: Welchen Informationen kann man glauben? Wie vergewissert man sich, dass die Aufnahmen nicht gestellt oder gefälscht sind, um einer anderen Konfliktpartei zu schaden? Mit solchen Fragen sehen wir uns heute wieder konfrontiert. Denn unter den Inhalten, die mutmaßlich aus der Ukraine stammen, findet sich auch Propaganda: Das russische Militär inszeniert sich als möglichst stark, während die ukrainische Seite versucht, mit erfolgreichen Gegenschlägen zu glänzen. Ebenso wissen sich die Staatschefs medienvirksam in Szene zu setzen: Der ukrainische Präsident Wolodymyr Selenskyj präsentiert sich volksnah in Militäruniform und bespricht sich vertraut mit Soldaten. Putin setzt hingegen auf ein Bild des unantastbaren Staatsmannes, der selbst andere Regierungschefs nicht an sich heranlässt.

Zu Beginn des Arabischen Frühlings schien es für Medienschaffende noch so gut wie unmöglich, online verbreitete Inhalte ohne vertrauenswürdige Quellen vor Ort zu prüfen. Selbst für große Zeitungen mit zahlreichen Kontakten gestaltete sich das Fact-Checking angesichts der chaotischen Zustände schwierig. Doch nach und nach entwickelte man immer bessere Methoden, um die Authentizität von Aufnahmen aus der Ferne sicherzustellen. Aber es schien ausgeschlossen, die enorme Menge an Daten zu bewältigen.

»Es war mehr Information verfügbar als jemals zuvor, wodurch die Stellen, die Fakten prüfen und verbreiten sollen, heillos überfordert waren«, erklärt Eliot Higgins in seinem 2021 erschienenen Buch »Digitale Jäger«. »Wer hatte schon Zeit, all das Material zum Syrienkonflikt durch-



VOLKSNÄH Der ukrainische Präsident Wolodymyr Selenskyj zeigt sich immer wieder im Dialog mit Soldaten und Bürgern: hier in Butscha, einem Vorort von Kiew, in dem nach dem Abzug der russischen Truppen zahlreiche tote Zivilisten gefunden wurden.

zugehen, das das Internet überschwemmte?« Wie sich herausstellte, war Higgins – ebenso wie viele andere Personen – dazu bereit.

Damit konnten sich erstmals zahlreiche Privatpersonen der so genannten Open-Source-Intelligence (kurz: OSINT) widmen. Der Begriff stammt aus der Welt der Geheimdienste und scheint sich selbst zu widersprechen. Während sich »open source« auf frei verfügbare und nachverfolgbare Quellen bezieht, zielt »Intelligence« meist darauf ab, geheime Informationen zu sammeln und diese für sich und seine Organisation zu behalten. Ähnlich arbeiten investigative Journalisten der alten Schule, die sich an unbeobachteten

UNANTASTBAR Kreml-Chef Wladimir Putin wahrt selbst anderen Staatsoberhäuptern gegenüber Distanz. Der riesige Tisch, an dem Putin den französischen Präsidenten Emmanuel Macron empfangen hat, ist inzwischen weltberühmt.



Orten mit Whistleblowern treffen und auf vertrauliche Dokumente zugreifen. In solchen Fällen muss sich die Öffentlichkeit darauf verlassen, dass die Reporter gewissenhaft recherchiert haben.

Im Open-Source-Journalismus ist das hingegen anders: Die Leserinnen und Leser können die Beiträge anhand der angegebenen Quellen eigenständig nachprüfen. Dadurch entsteht eine neue Art der Berichterstattung. »Angesichts der Informationsflut ist es wichtig, Fakten zur Verfügung zu stellen, damit man sich selbst eine Meinung bilden kann«, so die Journalistin Sophie Timmermann, Faktencheckerin beim deutschen Recherchezentrum »Correctiv«.

Einer der bekanntesten internationalen Nachrichtendienste für investigative Open-Source-Beiträge ist »Bellingcat«, das Higgins 2014 gegründet hat. Dabei handelt es sich um ein nicht gewinnorientiertes Netzwerk, das aus etwa einem Dutzend fester Mitarbeiter und zahlreichen freiwilligen Helferinnen und Helfern besteht. Überraschenderweise sind viele dieser Onlinedetektive weder gelernte Journalisten noch Politikwissenschaftler oder Nahostexperten. »Die Leute kommen aus ganz verschiedenen Bereichen. Ein Kollege war vorher beim Militär. Eine Kollegin war ursprünglich Polizistin. Manche arbeiteten zuvor bei NGOs, andere waren Analysten. Die unterschiedliche Expertise hilft uns bei der Recherche enorm«, so Johanna Wild, Mitarbeiterin von Bellingcat, in einem Interview mit »Spektrum.de«. »Uns eint, dass wir Missstände wie Kriegsverbrechen oder Menschenrechtsverletzungen aufdecken wollen.«

Amateurdetektive auf der Jagd im Netz

Auch Higgins ist nicht vom Fach. Auf den ersten Blick gab es nichts, das ihn dafür qualifizierte, eine besondere Rolle bei der Kriegsberichterstattung des Arabischen Frühlings zu spielen: Er hatte sein Studium der Medienwissenschaften abgebrochen und ging unter anderem administrativen Aufgaben im Finanzbereich nach. Weil seine Jobs ihn langweilten, verfolgte er während der Arbeitszeit die Nachrichten und informierte sich auf verschiedenen Youtube-Kanälen und Twitter-Profilen über die aktuelle Lage im Nahen Osten. Dabei fielen ihm die vielen Beiträge und Videos auf, welche die Medien häufig erst Tage später – wenn überhaupt – aufgriffen. Er machte sich einen Spaß daraus, immer wieder relevante Inhalte in den Kommentar-

KREMLIN POOL / RUSSIAN DOK / PICTURE ALLIANCE



AUF EINEN BLICK DER AUFSTIEG DER DIGITALEN SPÜRNASEN

- 1 Dank Smartphones und einer guten Netzardeckung gelangen inzwischen viele Aufnahmen aus Krisengebieten nach außen – auch ohne Korrespondenten vor Ort zu haben.
- 2 Nicht alle Inhalte sind echt, manche Beiträge dienen der Propaganda. Onlinedetektive haben daher ausgefeilte Methoden entwickelt, um Informationen zu verifizieren.
- 3 Damit konnten sie schon zahlreiche Verbrechen offenlegen: vom Abschuss eines Passagierflugzeugs bis zu Giftgasangriffen. Allerdings kommt die Strafverfolgung nicht immer hinterher.

spalten der britischen Zeitung »The Guardian« zu veröffentlichen. Bis ein anderer Leser ihn irgendwann fragte, woher er denn wisse, dass eines der geposteten Videos echt sei.

So rutschte Higgins ganz unabsichtlich in den Open-Source-Journalismus: Er nahm die aufgezeichneten Bilder genau unter die Lupe, indem er Merkmale in der Landschaft mit öffentlich zugänglichen Satellitenbildern abglich, die in dem Video durchlaufenden Straßen nachzeichnete und sie mit Karten auf Google Maps verglich. So konnte er die Aufnahme auf fünf mögliche Orte eingrenzen. Um sich festzulegen, nutzte er sein Netzwerk: Inzwischen hatte er viele Follower auf Twitter, die sich ebenfalls für den Arabischen Frühling interessierten. Zusammen mit weiteren Onlinedetektiven gelang es ihm, zahlreiche Belege dafür zu sammeln, dass das Video nur aus einem bestimmten Ort stammen konnte.

Die Frage war nun, was er mit all diesen Informationen anfangen sollte. Damit sie nicht verloren gingen, gründete Higgins den »Brown Moses«-Blog (benannt nach einem Song von Frank Zappa), in dem er seine Arbeit sammelte. Anstatt diese Fundstücke aus den sozialen Medien in Kommentarsektionen von Nachrichtenseiten zu veröffentlichen, nutzte er nun seinen Blog. Das gab ihm die Möglichkeit, die Authentizität der Social-Media-Beiträge zu prüfen. Bald erregte er damit die Aufmerksamkeit etablierter Medien wie der »New York Times«, aber auch von Menschenrechtsorganisationen, die seine Recherchen aufgriffen. Angesichts der Menge an Inhalten und der vielen Freiwilligen, die dazu bereit waren, in ihrer Freizeit als Onlinedetektive zu ermitteln, gründete Higgins schließlich das Nachrichtennetzwerk Bellingcat.

Es ist äußerst beeindruckend, was sich alles aus frei zugänglichen Informationen herausfinden lässt. Bellingcat half etwa dabei nachzuweisen, dass Assad 2013 im syrischen Ghouta Giftgas gegen die Zivilbevölkerung einsetzen ließ. Des Weiteren konnten die Onlineermittler die Herkunft

der Flugabwehrakete nachverfolgen, die 2014 das malaysische Passagierflugzeug MH 17 abschoss – und erkannten, dass die Rakete von Russland aus in die ukrainischen Separatistengebiete transportiert wurde. Zudem konnten sie die russischen Geheimdienstler identifizieren, die 2018 den ehemaligen Doppelagenten Sergej Skripal und seine Tochter Yulia in Großbritannien mit dem Nervengift Novichok vergiftet haben. Andere Open-Source-Beiträge legen Kriegsverbrechen in weiteren arabischen und afrikanischen Ländern offen. Auch der Sturm auf das Kapitol in Washington D.C. am 6. Januar 2021 motivierte zahlreiche Onlineermittler, darunter die Recherchegruppe »Deep State Dogs«, die Aufrührer zu enttarnen, um das FBI bei seiner Arbeit zu unterstützen.

Aber wie ist das überhaupt möglich? Ein entscheidender Faktor von OSINT ist die Schwarmintelligenz: Was ein Einzelner übersieht, wird ein anderer womöglich bemerken. Da zudem alle Quellen öffentlich einsehbar sind, verringert sich dadurch die Wahrscheinlichkeit, unbemerkt auf Falschinformationen hereinzufallen. Seit dem Arabischen Frühling haben Onlineermittler ihre Methoden immer weiter verfeinert, um die Authentizität von Inhalten zu überprüfen. Das macht sich nun im Ukraine-Konflikt bezahlt.

Möchte man herausfinden, ob eine Aufnahme echt ist, sollte man zuerst ihren Ursprung prüfen: Wo wurde sie erstmals veröffentlicht? Dafür kann man zum Beispiel die umgekehrte Bildsuche nutzen, die sowohl Google als auch

andere Suchmaschinen anbieten. Die Suchanfrage besteht dann aus dem Bild, und als Ergebnis erhält man ähnliche Aufnahmen – oder die gleiche, falls sie schon einmal aufgetaucht ist. So kann man feststellen, ob ein Inhalt älter ist beziehungsweise in einem anderen Kontext entstand.

Mit dieser einfachen Technik lassen sich bereits einige Falschinformationen entlarven. Zum Beispiel machte am 28. Februar 2020, zu Beginn der Covid-19-Pandemie, ein Video auf der Social-Media-Plattform TikTok die Runde, in dem eine riesige Menschenmenge zu sehen ist, die einen Supermarkt belagert. Das Video behauptete, es zeige einen Aldi-Markt in der niederländischen Stadt Haarlem, wo die Bürger offenbar aus Angst vor den Auswirkungen der Pandemie Panikkäufe tätigten. Innerhalb kürzester Zeit war es vier Millionen Mal abgespielt worden und hatte mehr als 10 000 Kommentare. Das befeuerte die Befürchtungen der Menschen, während Regierungen auf der ganzen Welt der Bevölkerung versicherten, dass es keine Lebensmittelknappheit geben werde und man von Hamsterkäufen absehen solle.

Als die Aufnahme zu Chantal Verkroost gelang, einer Mitarbeiterin von Bellingcat, vermutete sie eine Fälschung. Indem sie ein Standbild in die inverse Suche eingab und weitere Details analysierte, stellte sie fest, dass das Video bereits 2011 auf YouTube zu finden war und eigentlich aus Kiel stammt. Damals hatte Aldi einen besonders attraktiven Sonderverkauf gestartet, der viele Kunden anlockte.

Syrien und Ukraine: Ähnlicher als gedacht

Trotz vieler Unterschiede weisen der Krieg in Syrien und jener in der Ukraine einige Gemeinsamkeiten auf. Ersterer begann 2011 als Bürgerkrieg, nachdem die Regierung auf Proteste mit Gewalt reagiert hatte. Wegen der gesellschaftlichen Verwerfungen spaltete sich die Bevölkerung in zahlreiche Lager auf, die verschiedene Ziele verfolgten. So gab es prostaatliche Akteure, die sowohl gegen islamistische Radikale als auch gemäßigtere Oppositionelle kämpften. Die regierungsfeindlichen Gruppen unterteilten sich ebenfalls in Interessengemeinschaften, die sich gegenseitig bekriegten: Einige unterstützten Al-Qaida, manche den IS, andere wandten sich prokurdischen Kämpfern zu oder der »freien syrischen Armee«, die ebenso inhomogen war. Hinzu kam die Einmischung weiterer Staaten

wie Russland und Iran, die Bodentruppen nach Syrien schickten, um das Assad-Regime zu unterstützen. Nicht zuletzt ihnen verdankt es der Regierungschef, dass er noch an der Macht ist.

In der Ukraine begann der Konflikt 2014, nachdem Russland die Halbinsel Krim völkerrechtswidrig annektiert hat. Innerhalb der ostukrainischen Gebiete Donezk und Luhansk, die sich vom Rest des Landes abspalten wollten, entwickelte sich daraufhin ebenfalls ein Bürgerkrieg. Am 24. Februar 2022 gab der Kreml-Chef Wladimir Putin bekannt, eine »militärische Operation« gegen die Ukraine zu beginnen: Es marschierten russische Truppen ein. Die Fronten (mit russischen und prorussischen Gruppen auf der einen und ukrainischen und proukraintischen auf der anderen Seite) sind in diesem Fall

etwas übersichtlicher als im syrischen Krieg – auch wenn die Geschichte und die Gründe, die dazu führten, gleichfalls vielschichtig sind.

In beiden militärischen Konflikten hat Russland die Rolle des Aggressors inne, der mit großer Brutalität zuschlägt. Mit Erschrecken erkannten Expertinnen und Experten bereits während der ersten Kriegstage in der Ukraine einige Angriffsweisen wieder, die sie an das Vorgehen in Syrien erinnerten. Doch die wohl größte Gemeinsamkeit beider Kriege bildet die außergewöhnliche Dokumentation der dortigen Handlungen: Dank Smartphones und einer umfangreichen Netzaufdeckung, können die Menschen die Geschehnisse vor Ort aufzeichnen und durch einen Klick um die ganze Welt schicken.



TYLER MERBLER (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/37527185@N05/50840534053/) / CC BY 2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/2.0/LEGALCODE)

STURM AUF DAS KAPITOL Am 6. Januar 2021 griffen Anhängerinnen und Anhänger des abgewählten Präsidenten Donald Trump den Kongress der Vereinigten Staaten in Washington D.C. an.

Leider lässt sich eine Falschmeldung nicht immer so schnell entlarven. Daher sollte man sich in einem zweiten Schritt dem Nutzer oder Medium widmen, das einen Inhalt hochgeladen hat. Scheint die Quelle vertrauenswürdig? Vorige Veröffentlichungen sowie Personen, die dem Medium oder dem Profil folgen, beziehungsweise umgekehrt, können Hinweise auf deren Verlässlichkeit liefern. Stößt man etwa auf extremistische oder verschwörungstheoretische Hintergründe, muss man die Glaubwürdigkeit der verbreiteten Information anzweifeln.

Aufnahmeort clever ermitteln

Als dritten Schritt kann man sich der bekanntesten und wahrscheinlich beliebtesten Disziplin von Open-Source-Ermittlungen widmen: die Geolokalisierung. Inzwischen gibt es viele Menschen, die diese Tätigkeit als Hobby betreiben. Das verdeutlichen unter anderem die zahlreichen Gruppen, die sich dem Thema verschrieben haben, sowie Online-Games wie »Geoguessr«. Letzteres setzt einem Spieler ein zufällig auf Grundlage von Google Streetview gewähltes Panorama vor. Ziel ist es, möglichst genau herauszufinden, welchen Ort es abbildet. Wenn man Glück hat, kann man sich in der gezeigten Gegend bewegen, doch manchmal muss man anhand eines statischen Bilds den Standort ermitteln.

Zunächst kann man sich auf die Umgebung fokussieren und die wichtigsten Eigenschaften ausmachen: Gibt es besondere landschaftliche Merkmale wie Berge, Vegetation oder Flüsse? Wenn eine Stadt zu sehen ist, kann man anhand der Architektur oder von Bauwerken wie Kirchen, Moscheen, Türmen oder Brücken manchmal auf ein Land oder gar einen genauen Ort schließen. Auch Straßenmarkierungen, Verkehrsschilder oder Fahrzeuge können viel über eine Lage verraten. Hat man einen Verdacht, lässt sich das Gesehene mit Daten von Google Streetview vergleichen. Wenn das nicht ausreicht, gibt es noch Satellitenbilder, Datenbanken und Archive, die man durchstöbern kann,

um dort nach bestimmten Kennzeichen zu suchen, etwa nach einer Brücke. Eine weitere gute Quelle ist OpenStreetMap, das Aufnahmen enthält, die über jene von Google Maps hinausgehen.

Möchte man ein Video analysieren, in dem sich Personen entlang verschiedener Straßen bewegen, kann man den Weg nachzeichnen und mit Straßenkarten oder Satellitenaufnahmen abgleichen. So gelang es Higgins 2011, eine Aufnahme zu orten, welche die angebliche Übernahme der libyschen Stadt Brega durch oppositionelle Rebellen zeigte. In dem mehrere Minuten andauernden Video fahren Kämpfer durch eine Wohnsiedlung ohne markante Eigenschaften. Doch das Straßennetz wies ein ungewöhnliches Muster auf: eines, das zu einem östlichen Wohngebiet in Brega passt. Indem er schließlich die Details der Videoaufnahme mit Satellitenbildern der Gegend verglich, konnte er belegen, dass die Personen wirklich vor Ort waren.

Es ist erstaunlich, wie viele Informationen man aus einer einzigen Aufnahme herausziehen kann – selbst ohne über weit reichende technische Kenntnisse zu verfügen. Wenn man die Authentizität eines Inhalts prüfen möchte, spielt aber nicht nur der genaue Aufnahmeort eine Rolle, sondern auch der Zeitpunkt, an dem er entstand. Das war beispielsweise entscheidend, als Bellingcat den Transport der Flugabwehrakete, die das Passagierflugzeug MH 17 abgeschossen hatte, rekonstruiert hat. Nur so ließ sich in minutiöser Recherchearbeit die Route nachzeichnen, deren Startpunkt nach Russland führte.

Grundlage für solche zeitliche Untersuchungen bietet die Chronolokalisierung. Bevor man allerdings damit beginnen kann, muss man den genauen Entstehungsort einer Aufnahme kennen. Daher gehen Chrono- und Geolokalisierung immer Hand in Hand. Ist die geografische Lage geklärt, kann man zunächst im Internet nach weiteren Bildern der Gegend Ausschau halten: Haben sich die landschaftlichen Merkmale verändert? Wie sieht die Vegetation aus, wie die umliegenden Gebäude? Anhand dieser Vorarbeit lässt sich manchmal schon auf ein bestimmtes Jahr schließen. Zudem kann man einem Bild oft entnehmen, in welcher Jahreszeit es entstand.

Wenn man den Zeitraum eingegrenzt hat, kann man vergangene Wetterdaten heranziehen und mit den Witterungsbedingungen auf der Aufnahme vergleichen. Dadurch lässt sich mit etwas Glück der genaue Tag festlegen. Zu guter Letzt kann man sogar die Uhrzeit bestimmen. Denn durch die Ausrichtung der Schatten kann man den Sonnenstand und damit – sofern der Ort und das Datum bekannt sind – den exakten Zeitpunkt berechnen. Dafür gibt es freizugängliche Programme wie SunCalc (siehe »Geo- und Chronolokalisierung«).

Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Faktor bei der Analyse sind Metadaten, die in Bildern und Videos stecken. Sie enthalten oft Informationen über den Zeitpunkt und den Aufnahmeort einer Datei und lassen sich über Programme wie Photoshop oder durch kostenlose Webanbieter auslesen. Zwar ist es möglich, diese Daten zu entfernen oder zu fälschen, aber viele Nutzerinnen und Nutzer machen sich nicht diese Mühe.

Mit solchen Methoden haben Onlineermittler bereits zahlreiche Falschmeldungen entlarvt. Die OSINT-Werkzeuge können jedoch nicht nur dabei helfen, die Authentizität von Inhalten zu prüfen. Sie dienen auch dazu, Personen zu identifizieren. Nach dem Sturm auf das US-Kapitol im Jahr 2021 bat das FBI beispielsweise die Öffentlichkeit um Hilfe, um die zahlreichen Videoaufnahmen des Ereignisses zu durchforsten. Viele Freiwillige, darunter Forrest Rogers, der inzwischen bei der »Neuen Zürcher Zeitung« arbeitet, nahmen sich der Aufgabe bereitwillig an (siehe Interview S. 71). Dass die Aufnahmen echt sind, steht dabei außer Frage, ebenso ist der Entstehungsort und die Tatzeit bekannt.

Das Problem ist hierbei eine anderes: Hat man eine Person ausgemacht, die man identifizieren möchte, gilt es zunächst möglichst viele Videos nach ihr zu durchforsten. Wegen der Fülle an Material kann man dadurch die Handlungen einiger Beteiligter genau nachvollziehen. Je mehr Aufnahmen es von einer Person gibt, desto mehr Details kann man ausmachen: etwa körperliche Besonderheiten, Kleidung, Tattoos, Piercings oder Accessoires wie Handyhüllen. Wenn die Bilder keine softwaregestützte Gesichtserkennung zulassen, beispielsweise weil die Qualität zu schlecht ist, können solche Merkmale eine wichtige Rolle spielen. Auf diese Weise gelang es Rogers zusammen mit weiteren Freiwilligen, eine Frau aufzuspüren, die sich unter den Demonstranten befand. Ihre Kleidung hatte zwar keine besonderen Eigenschaften, doch ihre Handyhülle mit weißen Blüten war auffällig.

Da die Aufnahmen des Kapitols nicht mehr preisgaben, suchten die Onlineermittler nach weiteren Quellen. Die Vermutung lag nahe, dass die Frau bereits an anderen Ereignissen dieser Art teilgenommen hatte, etwa an Veranstaltungen von extremistischen Gruppierungen und radikalen Impfskeptikern. Die OSINT-Detektive wurden fündig. Sie fanden Videos einer Frau, die jener im Kapitol sehr ähnlich sah: Unter anderem hatte sie die gleiche Nasenform und besaß dieselbe Handyhülle. Anhand dieser neu entdeckten Aufnahme stießen sie auf ihren Namen, ihre Adresse und ihren Beruf. Rogers bündelte die gesammelten Beweise und übergab sie am 21. Januar 2021 dem FBI – nur 15 Tage nach dem Ereignis. Es dauerte allerdings zwei Wochen, bis die Behörde dazu kam, die übermittelten Schriften zu prüfen. Doch dann konnten sie die Verdächtige verhaften, die inzwischen für ihre Straftaten verurteilt wurde.

In diesem Fall nahm die Open-Source-Detektivarbeit ein erfreuliches Ende. Leider ist das nicht immer so, gerade wenn Verbrechen während eines Kriegs erfolgen, wie im Beispiel von Syrien und der Ukraine. In solchen Situationen müssen internationale Institutionen tätig werden, etwa der internationale Gerichtshof der Vereinten Nationen oder der internationale Strafgerichtshof (IStGH), die beide in Den Haag angesiedelt sind. Während Ersterer dafür zuständig ist, einen Staat zu verurteilen, der gegen die Charta der Vereinten Nationen verstößt, ist der IStGH für Einzelpersonen verantwortlich. Bisher wurden jedoch nur wenige Länder und Individuen durch diese überstaatlichen Organe zur Rechenschaft gezogen. Eine Schwierigkeit ist, dass viele Staaten – vor allem jene, in denen die Menschen-

rechtslage prekär ist – die grundlegenden Abkommen für die Gerichtshöfe nicht ratifiziert haben, darunter Syrien, Russland und die Ukraine. Wahr können die juristischen Instanzen trotzdem eingreifen, wenn der UN-Sicherheitsrat zustimmt. Im Fall der Kriegsverbrechen in Syrien haben sich allerdings die Vetomächte Russland und China einem Verfahren widersetzt. Ebenso wenig wird der Kreml es zulassen, bezüglich seines Angriffskriegs auf die Ukraine belangt zu werden.

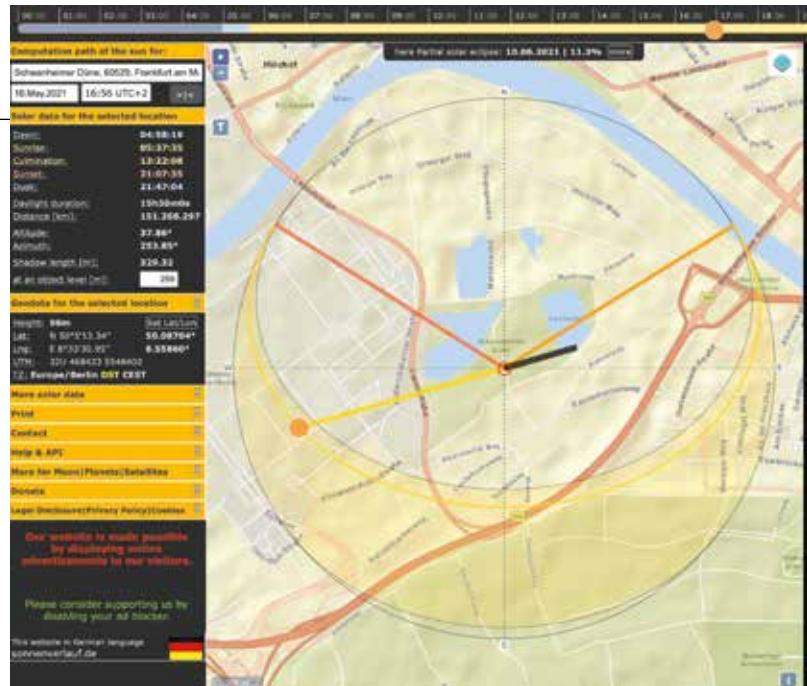
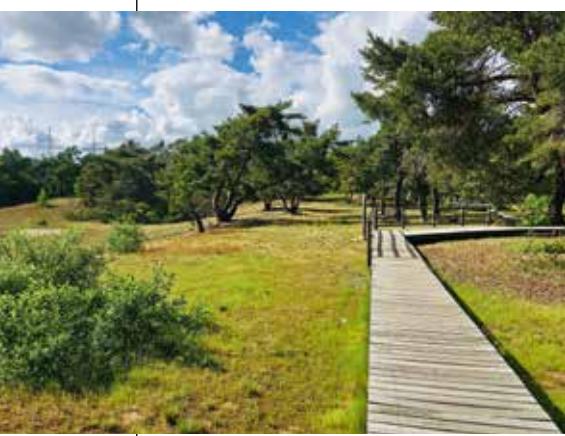
Es gibt aber auch noch einen anderen Weg, um Aggressoren zur Verantwortung zu ziehen: das so genannte Weltrechtsprinzip. Demnach können Personen unabhängig von ihrer Nationalität und dem Ort des begangenen Verbrechens belangt werden, wenn sie sich völkerrechtlich strafbar machen. Bisher haben 15 Staaten von diesem Prinzip Gebrauch gemacht, darunter Belgien, Frankreich, die USA und Deutschland. Die Bundesrepublik ist dabei Vorreiter und berief sich am häufigsten darauf. Zum Beispiel hat das Oberlandesgericht in Koblenz im Jahr 2021 zwei ehemalige Geheimdienstmitarbeiter des Assad-Regimes der systematischen Folter schuldig gesprochen. Im März 2022 forderte die frühere Bundesjustizministerin Sabine Leutheusser-Schnarrenberger den Generalbundesanwalt auf, Ermittlungen gegen den russischen Präsidenten Putin wegen des Angriffskriegs auf die Ukraine einzuleiten. Selbst wenn man ihn wohl nicht verhaften könne, sei es wichtig, jetzt schon Beweise zu sichern, so die Politikerin im Morgenmagazin des ZDF am 7. März 2022.

Die Geschichte schreibt künftig nicht mehr nur der Gewinner

Auch OSINT-Ermittler haben inzwischen Datenbanken aufgesetzt, um Beweismittel zu verwahren und in Umlauf gebrachte Inhalte als authentisch oder gefälscht zu kennzeichnen (zum Beispiel auf <https://ukraine-facts.org/>). Ähnliche Bestrebungen gab es bereits für den Syrienkrieg: 2016 hat die Generalversammlung der Vereinten Nationen den »internationalen, unparteiischen und unabhängigen Mechanismus« (kurz: IIIM) für Syrien ins Leben gerufen, dessen Ziel es ist, Beweise von Kriegsverbrechen zu sammeln und aufzubereiten. Einige der darin enthaltenen Dokumente spielten eine wichtige Rolle bei Verurteilungen gemäß des Weltrechtsprinzips. »Es gibt den Ausspruch, dass die Geschichte von Gewinnern geschrieben wird«, so Higgins zur panarabischen Nachrichtenseite »The new arab«. »Ich glaube nicht, dass das in Syrien der Fall sein wird, angeichts der vielen Beweise, die aller Welt zugänglich sind.«

Das Problem ist allerdings, dass es keine einheitlichen Richtlinien gibt, wie man die digitalen Beweise sammeln, archivieren und einreichen kann, damit sie für die Strafverfolgung zugelassen werden. Darüber hinaus sind viele Behörden überfordert durch die Flut an Informationen, die sie erhalten. Um die Prozesse zu beschleunigen, braucht es einen Leitfaden für eine sachgemäße OSINT-Recherche.

Geordnete Strukturen erleichtern nicht nur die Arbeit der Strafverfolgungsbehörden, sondern stellen auch sicher, dass die Onlineermittler keine Persönlichkeitsrechte oder andere Gesetze verletzen. Aus diesem Grund hat die University of California in Berkeley zusammen mit den Verein-



SUNCALC. © 2015-2022 THOMAS HOFFMANN. TILES © ESRI. SOURCE: ESRI, DELORE, NAVTEQ, USGS, INTERMAP, INC., NIGL, ESI, JAPAN, METI, ESI, CHINA, HONG KONG, ESI, THAILAND, TOMTOM, 2012.

Geo- und Chrono- lokalisierung

Um den Entstehungsort und den Zeitpunkt eines Fotos zu ermitteln, gibt es zahlreiche Tricks, die sich auch ohne umfangreiche technische Kenntnisse umsetzen lassen. Das Bild entstand beispielsweise bei einem Ausflug, den ich irgendwann Mitte Mai 2021 in die Schwanheimer Dünen bei Frankfurt unternommen habe. Doch wo genau und um wie viel Uhr ich das Foto aufgenommen habe, weiß ich nicht mehr auswendig. Anhand der Datei kann man diese Informationen aber rekonstruieren.

Dafür muss man zunächst die GPS-Koordinaten bestimmen, an denen das Bild entstanden ist. Das ist in dem Fall nicht allzu schwer, da es in den Schwanheimer Dünen glücklicherweise Google-Streetview gibt. Auf meinem Foto ist ein hölzerner Steg zu sehen, was den Aufnahmestandort eingrenzt. Der Steg besitzt zudem an der linken Seite ein Geländer, das an einer Rechtskurve beginnt. Im linken Hintergrund des Bilds lassen sich Strommasten erkennen. Zusammen mit der Platzierung der Bäume genügen solche Merkmale bereits, um die Ortskoordinaten an Hand von Google Maps und Google Streetview zu bestimmen: 50° 05' 13,3" Nord, 8° 33' 30,9" Ost.

Damit lässt sich nun herausfinden, wann ich an diesem Ort war.

Dafür muss man sich zunächst die Schatten des Bilds ansehen. Anhand ihrer Ausrichtung und des Kompasses bei Google Maps stellt man fest, dass die Sonne aus westlicher Richtung scheint und schon relativ tief über dem Himmel hängt. Das Foto muss also am späten Nachmittag oder frühen Abend entstanden sein. An diesem Tag war es zudem leicht bewölkt. In einem weiteren Schritt kann man die Wetterverhältnisse Mitte Mai 2021 online einsehen, um den Tag der Aufnahme zu finden. Tatsächlich hat es am 13., 14., 15., 17. und 18. Mai des betreffenden Jahres nachmittags geregnet. Das lässt den 16. als mögliches Datum zu.

Auch die genaue Uhrzeit kann man ermitteln. Dafür gibt es Software wie SunCalc, ein frei zugängliches Browser-Programm. Anhand geografischer Koordinaten und eines Datums berechnet es den Sonnenstand und die entsprechenden Schattenlängen und -ausrichtungen zu verschiedenen Zeitpunkten. Auf dem Bild zeigt der Schatten ziemlich exakt senkrecht vom Steg weg. Das entspricht bei SunCalc einer Zeit von etwa 17 Uhr. Doch besonders präzise ist das auf diese Weise bestimmte Ergebnis nicht.

Möchte man es genauer wissen, gibt es eine weitere Methode. Sie

funktioniert allerdings nur, wenn die Schatten auf dem Bild parallel zum Horizont verlaufen und auf eine möglichst geraden Ebene fallen, wie es auf dem Foto der Fall ist. Mit einem Bildbearbeitungsprogramm (oder einem Lineal) kann man die Länge eines Pfostens (256 Pixel) messen und die des dazugehörigen Schattens (330 Pixel). Wie groß der Pfosten in Wirklichkeit ist, spielt dabei keine Rolle, nur das Verhältnis zwischen einem Objekt und seinem Schatten ist für die Zeitbestimmung entscheidend. Wenn man die Daten in SunCalc einträgt, berechnet das Programm daraus die passende Uhrzeit – in diesem Fall 16.56 Uhr.

Daneben gibt es einen weiteren effektiven Trick, um etwas über ein Bild herauszufinden: Metadaten. Denn Kameras und Mobiltelefone speichern in der Regel zahlreiche Informationen, die sich aus der Bilddatei auslesen lassen. Dafür kann man Programme wie Photoshop oder kostenlose Anbieter im Internet nutzen. Analysiert man das Foto der Schwanheimer Dünen, erfährt man, mit welchem Smartphone-Modell ich es gemacht habe, welche Kamera sich darin befand, wie groß das Bild ist und so weiter. Aber auch das Datum und Uhrzeit hat mein Handy gespeichert: Das Foto entstand am 16. Mai 2021 um 16.51 Uhr.

ten Nationen 2020 das so genannte Berkeley-Protokoll herausgegeben, eine Art Leitfaden für OSINT-Recherchen. Einer der Punkte rät beispielsweise dazu, die Übermittlung von Informationen möglichst effektiv und transparent zu gestalten: Neben einer lückenlosen Dokumentation (wie kam man an die Daten, wie wurden sie untersucht und so fort) und Offenheit gegenüber Wissenslücken sollte man nur jene Inhalte mit einbeziehen, die wirklich relevant sind – und auf alles Weitere verzichten.

Ein anderer wichtiger Punkt besteht in der ordnungsgemäßen Sicherung von Daten, die DSGVO-konform sein sollte und nur Berechtigten den Zugang gewährt. Das Berkeley-Protokoll stellt bisher allerdings nur eine Empfehlung dar. Es ist nicht garantiert, dass Strafverfolgungsbehörden bei Befolgung aller Regeln die eingereichten Beweise als solche akzeptieren.



TAISIYA VORONTSOVA / TASS / DPA / PICTURE ALLIANCE

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema:
spektrum.de/t/ukrainekrieg

Die OSINT-Arbeit etabliert sich immer mehr. Bereits 2017 erließ der internationale Strafgerichtshof einen Haftbefehl gegen Mahmoud al-Werfalli, ehemaliger Kommandant der libyschen al-Saiqa-Brigade, hauptsächlich auf Grundlage von Beweisen, die aus sozialen Medien stammen. Das sorgte für viel Aufmerksamkeit, weil es das erste Mal war, dass ein internationales Gericht seine Entscheidung fast ausschließlich auf öffentlich zugängliche Information stützte – und nicht auf Augenzeugenberichte oder Ähnliches.

Umso wichtiger ist es, Open-Source-Ermittlungen gewissenhaft durchzuführen, wie es das Berkeley-Protokoll vorgibt. Zudem dient dieses unerfahrenen Personen als Leitfaden, die sich im OSINT-Bereich noch nicht allzu gut auskennen. Denn mit der Tätigkeit kann man auch erheblichen Schaden anrichten. Das zeigt das Beispiel eines 20-jährigen Collegestudenten aus Alabama, der Anfang März 2022 ein Bild von jemandem aus der ukrainischen Seehafenstadt Cherson erhielt. Die Aufnahme wurde von einem Balkon aus gemacht und zeigte russische Truppen, die sich in der Stadt bewegen. Um die Authentizität des Fotos zu prüfen, versuchte der US-amerikanische Student, es zu orten – und veröffentlichte seine Analyse inklusive der ermittelten GPS-Koordinaten auf Twitter. Nach einigen Minuten dämmerte ihm, dass er damit seine Quelle zur Zielscheibe gemacht hatte. Er löschte zwar den Tweet, doch bis dahin war er bereits über 100-mal geteilt worden. »Bevor man etwas veröffentlicht, sollte man sich bewusst sein, dass man die Leute, die vor Ort sind, in Gefahr bringen kann«, so die Faktencheckerin Timmermann.

Ebenso wichtig ist es, die Identitäten von Personen geheim zu halten – und sie, wenn nötig, zunächst nur an Strafverfolgungsbehörden zu übergeben. Da allerdings

viele ungeschulte Freiwillige in dem immer beliebter werdenden Gebiet mitmischen, wächst die Gefahr fahrlässiger Verhaltensweisen. Zudem sollten Onlinedetektive versuchen, möglichst anonym im Internet aufzutreten und wenige Hinweise auf die eigene Identität zu hinterlassen. Denn durch OSINT-Ermittlungen machen sich viele Personen Feinde, nicht selten erhalten sie Drohungen.

Das Berkeley-Protokoll spricht außerdem die geistige Gesundheit an. Selbst wenn man bei der Onlinerecherche nicht im Außeneinsatz ist, wird man dennoch mit traumatisierenden Inhalten konfrontiert. So auch Timmermann: »Von einem Tag auf den anderen erreichte uns diese Flut an Bildern und Videos«, erzählt sie. Correctiv betreibt einen Whatsapp-Chatbot, dem man Onlineinhalte senden kann. Die Mitarbeiter prüfen dann, ob es sich um Falschmeldungen handelt. »Man stumpft leider relativ schnell ab«, fährt die gelernte Journalistin fort. Wichtig sei es, einen Rückhalt im Team zu haben und sich immer wieder anderen Aufgaben zu widmen. Wie Higgins in seinem Buch berichtet, haben manche OSINT-Ermittler auf Grund ihrer Arbeit Posttraumatische Belastungsstörungen entwickelt.

Trotz dieser Herausforderungen halten viele an ihrer oft freiwilligen Tätigkeit fest – und sorgen Tag für Tag dafür, dass die Missstände in der Welt nicht unter Verschluss bleiben. Das ist ganz im Sinne von Marie Colvin: »Ich werde weiterhin versuchen, die Informationen nach draußen zu kriegen«, lautete eine ihrer letzten Nachrichten vor ihrem Tod an ihren Redakteur. Zwar wird die Open-Source-Arbeit niemals die Erfahrungen von Korrespondenten vor Ort ersetzen, die sich mit Zeugen unterhalten und die Geschehnisse einordnen können. »OSINT-Journalismus bietet aber eine gute Ergänzung – es ist ein weiteres Werkzeug, das man nutzen kann«, so Timmermann. ▶

QUELLEN

Ashraph, S. et al.: Berkeley Protocol. Human Rights Center UC Berkeley, 2020
<https://humanrights.berkeley.edu/programs-projects/tech-human-rights-program/berkeley-protocol-digital-open-source-investigations>

Higgins, E.: Digitale Jäger: Ein Insiderbericht aus dem Recherchenetzwerk Bellingcat. Quadriga Berlin, 2021

McLoughlin, P.: The researchers working to bring Syria war crimes to light. The New Arab, 2021
<https://english.alaraby.co.uk/analysis/researchers-working-bring-syria-war-crimes-light>

Pérez, G. M. et al.: The not yet exploited Goldmine of OSINT: Opportunities, open challenges and future trends. IEEE Access 8, 2020

Roth, J., Renner, A.: Die Jagd nach der »Pink Hat Lady«: Wie Online-Detektive den Krawallmachern vom Capitol auf die Spur kamen. NZZ, 2022
<https://www.nzz.ch/international/wie-detektive-den-krawallmachern-vom-capitol-auf-die-spur-kamen-id.1661769>

WEBLINKS

Tipps und Tricks für Einsteiger, um Online-Inhalte zu verifizieren:
<https://www.bellingcat.com/resources/2021/11/01/a-beginners-guide-to-social-media-verification/>

INTERVIEW

»FAKten sind IMMER DAS ERSTE OPFER EINES KRIEGS«

Im Netz findet man zahlreiche Bilder und Videos von Straftaten. Doch was davon ist echt? Der investigative Journalist Forrest Rogers erklärt, wie er die Inhalte prüft – und welche Folgen das hat.

► spektrum.de/artikel/2021596

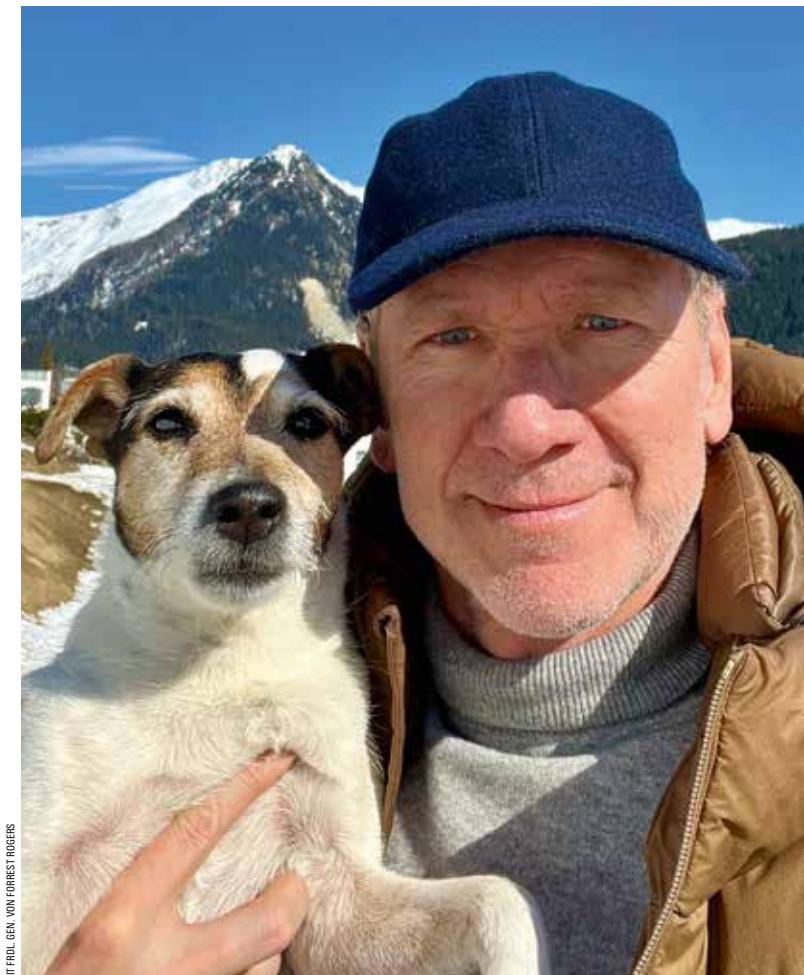
Dank der fortgeschrittenen Digitalisierung ist der Krieg in der Ukraine so gut dokumentiert wie wenige andere Konflikte. Jeder kann zu Hause selbst Zeuge werden und die Entwicklungen teilweise live miterleben. Doch man muss vorsichtig sein: Nicht alles Gezeigte ist auch wirklich echt. Beide Kriegsparteien wissen sich zu inszenieren und nutzen soziale Medien für Propaganda.

Daher spielt die so genannte Open-Source-Intelligence (kurz: OSINT) inzwischen eine wichtige Rolle: Zahlreiche Freizeit-Ermittler prüfen anhand frei verfügbarer Daten, ob die geteilten Inhalte echt sind. Der studierte Journalist Forrest Rogers ist seit 2021 OSINT-Reporter bei der »Neuen Zürcher Zeitung« (NZZ). Mit seiner Arbeit konnte er bereits einige Verbrechen aufklären – doch die Arbeit hinterlässt auch ihre Spuren, wie er im Gespräch erzählt.

Herr Rogers, was treibt Sie bei Ihrer Arbeit am meisten an?

Dass die Wahrheit ans Licht kommt. Mir ist wichtig, dass sich die Leserinnen und Leser eine eigene Meinung bilden, und das können sie nur mit Fakten tun. Ich möchte den Leuten so viel Information geben, dass sie sich selbst ein Bild machen können.

Das ist Ihnen bereits gelungen: Dank Ihrer OSINT-Recherchen zum Sturm auf das Kapitol in Washington D.C. konnten mehrere Personen angeklagt werden. Ist diese Art der Beweisführung inzwischen etabliert?



Forrest Rogers

war in seiner Jugend bereits investigativer Reporter. Er studierte Journalismus, internationale Wirtschaft und Germanistik in den USA und Deutschland. Danach wurde er Berater und ist nun bei der NZZ.

Ja, besonders in den USA. Auf Twitter habe ich ein Team gegründet, das sich »Deep State Dogs« nennt. Gemeinsam gehen wir den Verbrechen des 6. Januars 2021 nach. Deshalb wird meine Arbeit oft in Gerichtsverfahren in den USA herangezogen. Mit unseren Ermittlungen konnten wir nicht nur die als »Pink Hat Lady« bekannte Aufrührerin enttarnen, sondern auch eine Person, die einen Polizisten getasert hat. Die Anklage hat fast ausschließlich auf meinen Open-Source-Informationen basiert.

Das muss ein schönes Gefühl sein, wenn man nicht nur über Verbrechen berichtet, sondern am Ende für Gerechtigkeit sorgen kann.

Durchaus. Es gab auch einen Fall, in dem sich einer der beteiligten Polizisten neun Tage nach dem Sturm auf das Kapitol umgebracht hat. Seine Witwe sollte keine Rente bekommen, weil es Suizid war. Aber ich konnte beweisen, dass er während des Ereignisses verletzt wurde, was zu einem Gehirntrauma führte, das Selbstmord zur Folge hatte. Dadurch änderte das Gericht seine Meinung und interpretierte das Versterben als Tod im Amt – seine Frau erhält nun eine Witwenrente.

Kann man mit den jetzigen OSINT-Methoden mehr Verbrechen ahnden?

Ja. Außerdem ist die OSINT über die Jahre immer effizienter geworden. Es wurden Programme entwickelt, die viel Arbeit übernehmen. Aber eine Ein-Klick-Lösung wird es niemals geben.

Sie arbeiten schon lange Zeit in dem Bereich der öffentlich zugänglichen Informationsbeschaffung – bevor es den Begriff OSINT überhaupt gab. Wie sind Sie vor Social-Media vorgegangen?

Ich las verschiedene Zeitungen und befragte Kontakte. Im Lauf der Jahre lernt man, wie man sich Informationen holt. Social Media ist ein Phänomen der letzten zehn Jahre, die Recherche in dem Bereich ist ziemlich neu und hat sich laufend verbessert. In den zurückliegenden Monaten gab es eine regelrechte Explosion auf dem Gebiet der OSINT.

Das sieht man an den vielen Freiwilligen, die aus allen möglichen Bereichen kommen, und sich damit die Zeit vertreiben. Inwiefern prägt das den Journalismus?

Wenn man als Journalist OSINT betreibt, ist die eigene Glaubwürdigkeit jeden Tag aufs Spiel gesetzt – besonders jetzt, da die Glaubwürdigkeit der Medien durch Fake News und so weiter hinterfragt wird. Wir Journalisten müssen täglich dagegen ankämpfen. Dabei spielt OSINT eine große Rolle. So liefert man den Lesern Beweise, damit sie sich selbst vergewissern können. Mit dem Krieg in der Ukraine hat OSINT weiter an Bedeutung gewonnen, denn Fakten sind immer das erste Opfer eines Kriegs.

Was den Informationskrieg angeht, scheint die Ukraine vorn zu liegen.

Russland hat die Macht der Information vollkommen unterschätzt. Es gibt heutzutage eine enorme Menge von Daten.

Man darf nicht vergessen, als Putin im KGB aktiv war, herrschten noch andere Methoden. Aber jetzt werden überall, wo man hingehört, Bilder und Videos aufgenommen und ins Internet gestellt. Und dann gibt es öffentlich zugängliche Gesichtserkennungsprogramme, die man nutzen kann.

Ist es schwer, die Authentizität von Bildern aus dem Krieg in der Ukraine zu prüfen?

Am Anfang des Kriegs war es leichter: Wenn man etwa ein zerstörtes Wohnhaus sah und das Video am 25. Februar erhalten hatte, konnte man das mit Satellitenbildern abgleichen. So war man sicher, dass die Aufnahme nach Ausbruch des Krieges entstanden war und damit aktuell ist. Aber wenn der Krieg schon zwei, drei Wochen lang wütet, wird es schwerer. Weitere Hinweise liefern Metadaten, die in jedem Bild, jedem Video enthalten sind. Manchmal liefern sie die GPS-Koordinaten, manchmal den Zeitpunkt. Allerdings können diese Daten auch geändert werden.

Das hat beispielsweise Russland angesichts des Massakers in Butscha versucht: Sie haben behauptet, die Gräueltaten seien passiert, nachdem sie den Ort verlassen haben. Um das zu widerlegen, habe ich etwa Drohnenaufnahmen genutzt, die definitiv während der russischen Besatzung entstanden sind. Darauf konnte man schon Leichen auf der Straße sehen.

Wie ist das, wenn man ständig mit solchen Bildern konfrontiert ist?

Ich versuche, mich auf die Sachen zu fokussieren, die ich für meine Arbeit brauche. Ich weiß genau, was ich in einem Bild sehen will und versuche, mir alles so sachlich wie möglich anzuschauen, um nicht den menschlichen Aspekt wahrzunehmen. Bei einer solchen Arbeit muss man sowieso hyperfokussiert und hypersensibel sein: Man sieht alles, man hört alles, man spürt alles. Und wenn man keinen Schutz hat, der einen alles fachlich betrachten lässt, dann ist das schlimm.

Es gibt Berichte über Posttraumatische Belastungsstörungen bei OSINT-Ermittlern.

Ja, die Gefahr für Compassion Fatigue oder indirekte Traumatisierung ist da. Wenn ich zum Beispiel den sachlichen Blick nicht habe und die grausamen Details wahrnehme, dann ist der Tag gelaufen – es ist schwer zu verarbeiten. Das ist mir vor Kurzem passiert, als ich vorhatte, Urlaub zu nehmen. An meinem letzten Arbeitstag ging ich gemütlich ins Büro, wollte alles ganz ruhig abschließen, mich dann ausklinken und wegfahren. Doch das war der Morgen, an dem das russische Militär den Bahnhof in Kramatorsk mit einer Bombe angegriffen hat. Ich sah 34 Leichen vor mir, darunter ein Kleinkind, das ohne Kopf auf einer Parkbank lag. Ich war nicht darauf vorbereitet.

Wie gehen Sie damit um?

Ich versuche jetzt öfters Pausen einzulegen und nicht stundenlang am Stück zu recherchieren. Ich gehe spazieren und schnappe frische Luft. Ich spreche mit Kolleginnen und Kollegen über die Herausforderungen. Aber was wir OSINT-



KRAMATORSK Am 8. April 2022 wurden bei einer Evakuierungsaktion mindestens 50 Menschen durch den Beschuss mit ballistischen Raketen getötet.

Ermittler erleben, ist nichts im Vergleich zu dem, was die Kriegsreporter und die Leute vor Ort erfahren.

Haben Sie ein großes Team, das für die Recherchearbeit zuständig ist, oder wie kommen Sie sonst mit der ganzen Flut an Information zurecht?

Im Vorfeld und während des Krieges arbeite ich oft 16 bis 18 Stunden pro Tag. Das ist wichtig, um unseren Lesern die genauesten und aktuellsten Informationen zu liefern. Das Gute ist, dass meine Kolleginnen und Kollegen die OSINT-Recherche auch oft selbst in die Hand nehmen. In Kursen bringe ich ihnen das dafür nötige Handwerk bei. Ich prüfe dann die gesammelten Informationen oder helfe bei manchen Punkten weiter.

Ist es schwer, die Techniken zu lernen?

Man braucht vor allem ein geschultes Auge und dafür heißt es: üben, üben, üben. Zum Beispiel hatten wir einmal das Bild einer Person bei einem Essen und wussten nicht, wo es entstanden ist. Dann bemerkte ich eine Spiegelung im Fenster. Als ich den Kontrast aufdrehte, konnte man ein Häuschen sehen. Also habe ich nach diesem Haus gesucht – und es gefunden.

Wichtig ist auch die Schwarmintelligenz. Vielleicht habe ich mehr Erfahrung, aber es kann immer sein, dass jemand etwas sieht, das mir entgangen ist. Bei der NZZ merken wir, dass OSINT mehr und mehr an Bedeutung gewinnt, und daher lassen wir sie immer häufiger in unsere Stories einfließen.

Wie ist das, wenn man es mit Deepfakes zu tun hat?

Deepfakes sind zum Glück noch nicht besonders gut. Bei den etwas gelungeneren Fälschungen kann man technische Methoden nutzen: Man kann etwa die Audiodatei mit dem Hintergrund vergleichen oder prüfen, ob die Schatten

richtig ausgerichtet sind. Zum Beispiel gab es das Deepfake von Selenskyj, in dem er den ukrainischen Truppen sagt, sie sollen ihre Waffen niederlegen – was offensichtlich ein Fake war. Leider sind seit der Coronapandemie viele Menschen verschwörungsfreudig. Einige glauben lieber etwas, das sehr skurril ist, als etwas, das normal ist.

Wird OSINT mehr zum Mainstream in den Medien?

Ja. Es gibt keinen Grund, es nicht zu nutzen.

Wenn ungeschulte Ermittler beteiligt sind, können sie ungewollt Schaden anrichten, indem sie etwa die Falschen beschuldigen?

Ja, die Gefahr ist schon da. Kürzlich hat zum Beispiel jemand auf Twitter behauptet, Putin sei nicht bei der Ostermesse gewesen. Zu dem Schluss kam die Person, nachdem sie ein Bild der Veranstaltung aus dem Jahr 2021 herangezogen hatte. Die Behauptung, Putins Bild sei gefälscht, wurde daraufhin überall geteilt. Dabei erkennt man eindeutig, dass er 2021 eine andere Krawatte anhatte – und es gibt noch viele weitere Belege dafür, dass Putin da war.

Haben Sie bei Ihrer Arbeit schon einmal Probleme wegen des Datenschutzes gehabt?

Nein. Ich bin Deutscher, ich verstehe Datenschutz und finde ihn sinnvoll. Als ich meine Recherche zum Sturm auf das Kapitol angefangen habe, konnte man kein Bild von mir mehr im Internet finden. Ich hatte alles gelöscht, weil ich Drohungen erhalten hatte. Aber die Daten, auf die ich für meine Arbeit zugreife, sind offen. Wenn eine Person zum Beispiel etwas auf Social Media veröffentlicht, dann gibt es keinen Datenschutz mehr. ▲

Die Fragen stellte **Manon Bischoff**, Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

DAS EINMALEINS IM KREIS

In einem endlichen Zahlenbereich, in dem auf die größte Zahl wieder die Eins folgt, gelten seltsame Rechenregeln. Wenn man diese auf eine naheliegende Weise ins Bild setzt, entstehen überraschende Muster.



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

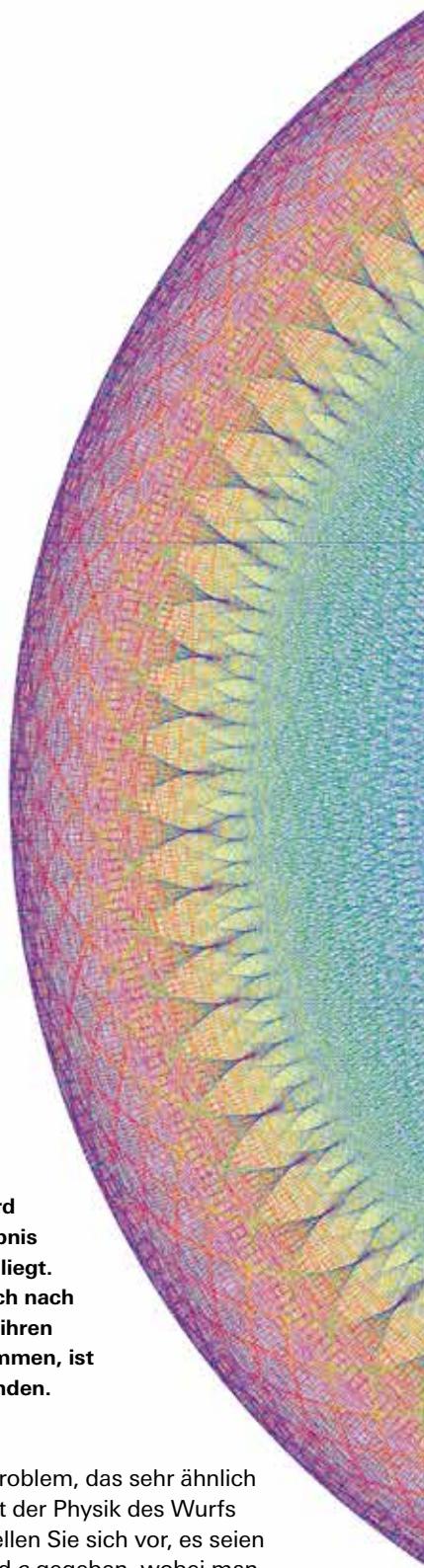
► spektrum.de/artikel/2021599

► Beim Boulespiel weiß man nie so genau, wie der unregelmäßige Sand die Kugel bremst oder gar ablenkt. Aber angenommen, die Kugel laufe auf einer sorgfältig konstruierten und unveränderlichen Bahn. Dann wären Sie mit etwas Übung in der Lage, sie so zu werfen, dass sie bis auf vielleicht zehn Zentimeter genau an einer vorherbestimmten Stelle zum Stehen kommt. Dafür sorgt der so genannte Zwischenwertsatz aus der Analysis. Die Funktion, welche die Daten des Abwurfs auf die Endposition abbildet, ist nämlich stetig. Ist die Kugel beim ersten Mal zu weit gerollt, werfen Sie im nächsten Anlauf mit etwas weniger Schwung, und sie wird früher stehen bleiben. Nach ein paar Versuchen – mal zu kurz, mal zu weit – können Sie ihr den richtigen Anfangsimpuls geben, im Rahmen der Genauigkeit, die Ihr Fingerspitzengefühl hergibt.

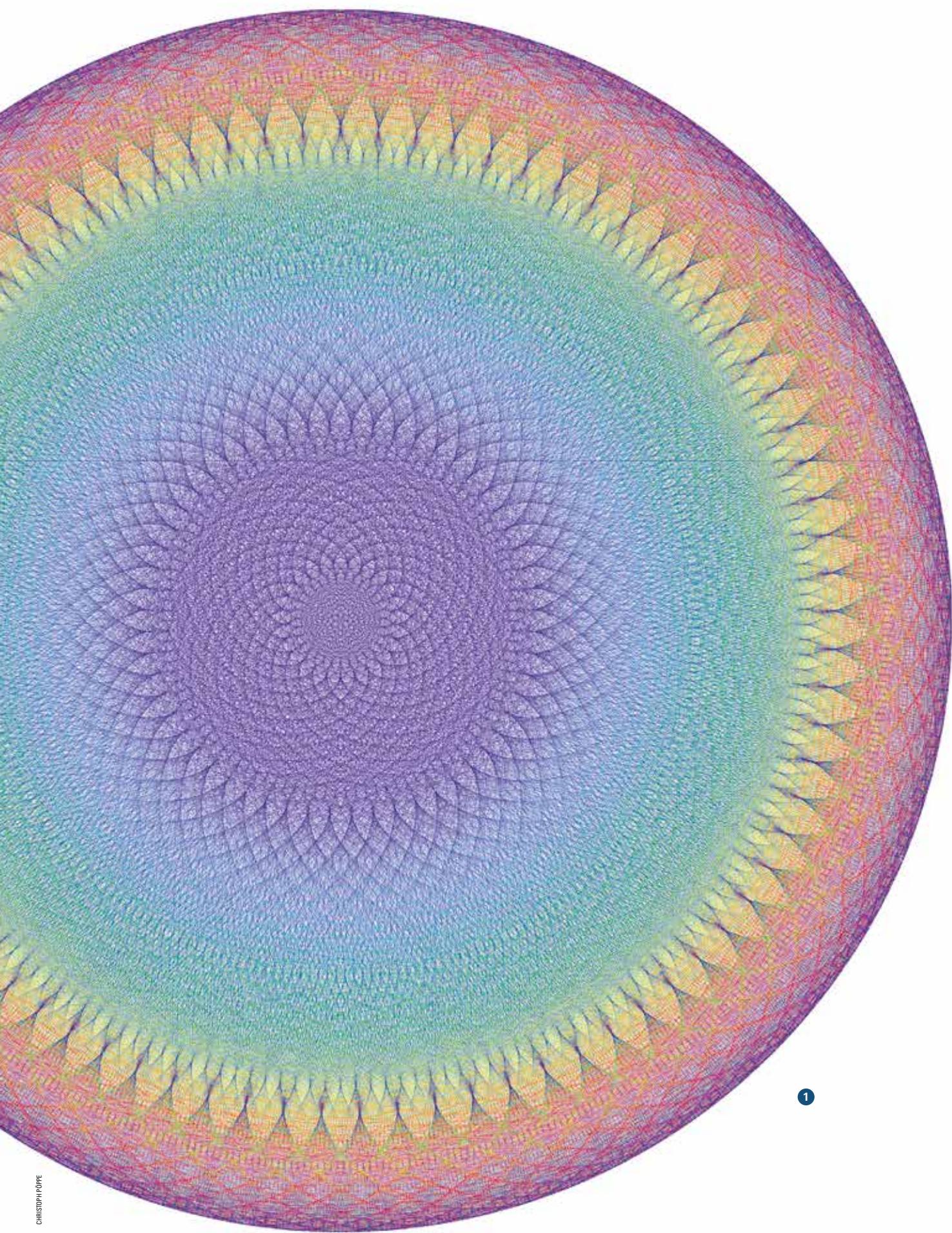
Wenn allerdings die Bahn der Kugel in eine Kreisbahn einmündet, es nur gewisse, voneinander deutlich getrennte Endpositionen gibt und Sie nicht nachvollziehen können, wie viele Runden die Kugel vor dem Stillstand dreht – kurz gesagt, wenn man nicht Boule, sondern Roulette spielt –, dann hilft Ihnen der ganze schöne Zwischenwertsatz nicht. Das Roulettespiel ist eben so gebaut, dass man aus der Endposition nicht erschließen kann, mit welchem Anfangsimpuls die Kugel geworfen wurde, und deshalb keine Möglichkeit hat, aus der Beobachtung des Spielverlaufs zu lernen.

DIE POTENZEN der Primzahl $b = 331$ modulo der Primzahl $p = 10037$. Die Zahlen von 1 bis $p - 1$ sind gleichmäßig auf dem Rand des Kreises angeordnet. Jede Zahl ist mit ihrem b -Fachen durch einen Strich (genauer: eine Kreissehne) verbunden. Dabei wird modulo p gerechnet: Wenn das Produkt $b \cdot n$ für eine Zahl n den Wert p übersteigt, wird so oft p abgezogen, bis das Ergebnis wieder im Bereich von 1 bis $p - 1$ liegt. Die Farbe jedes Strichs richtet sich nach seiner Länge. Wie die Bögen mit ihren auffälligen Spitzen zu Stande kommen, ist bisher nur unvollkommen verstanden.

Es gibt ein mathematisches Problem, das sehr ähnlich aufgebaut ist, selbst wenn es mit der Physik des Wurfs einer Kugel nichts zu tun hat: Stellen Sie sich vor, es seien die positiven reellen Zahlen b und c gegeben, wobei man sich b als ziemlich klein und c als ziemlich groß vorstellen muss. Für diese Werte gelte die Gleichung $b^n = c$. Wie groß ist dann n ?



CHRISTOPH PÖPPE



1

Für Aufgaben dieser Art hält die Schulmathematik eine Lösung bereit: n ist der Logarithmus von c zur Basis b . Für den Fall $b = 10$ gibt es dafür sogar eine Taste auf dem Taschenrechner. Für alle anderen Werte von b kommt man dank einer einfachen Umrechnungsformel mit wenigen Tastendrücken zum Ergebnis.

Im Allgemeinen ist n keine ganze Zahl; man erweitert den Potenzbegriff so, dass zum Beispiel $10^{0,301}$ eine eindeutig bestimmte Zahl ist, mit der man wie gewohnt rechnen kann, auch wenn die Idee, die Zahl Zehn 0,301-mal mit sich selbst zu multiplizieren, ziemlich absurd klingt. Und da die Logarithmusfunktion stetig ist, kann man ihre Werte zwar im Allgemeinen nicht über eine Formel berechnen, aber mit jeder beliebigen Genauigkeit über ein Näherungsverfahren bestimmen.

Jetzt gehen wir sozusagen vom Boule zum Roulette über. Wirwickeln die reelle Zahlengerade auf einem Kreis auf – was unendlich viele Windungen ergibt –, indem wir zwei Zahlen für gleich erklären, wenn sie sich um ein Vielfaches einer großen Zahl p unterscheiden: Wir rechnen »modulo p «. Immer wenn das Ergebnis einer Rechnung außerhalb des Bereichs von 0 bis p liegt, addieren oder subtrahieren wir p so oft, bis wir es damit in diesen Bereich bugsiert haben.

Außerdem interessieren wir uns nicht für alle Werte zwischen 0 und p , sondern nur für die ganzzahligen. Die klassische Darstellung dafür ist ein Kreis, auf dem die Zahlen von 0 bis $p - 1$ gleichmäßig angeordnet sind wie in einem Roulettekessel – abgesehen davon, dass in Letzterem die einzelnen Zahlen noch einmal durcheinanderge-

würfelt sind. Man pflegt diesem Kreis den Mittelpunkt 0 und den Radius 1 zu geben (»Einheitskreis«), damit die Rechnerei einfacher wird.

Zusätzlich fordern wir, dass p eine Primzahl ist. Dann nämlich sind nicht nur Addition und Multiplikation unter ganzen Zahlen modulo p stets durchführbar, sondern auch Divisionen, von der stets verbotenen Teilung durch 0 abgesehen. Denn da p eine Primzahl ist, kann kein Produkt von zwei Zahlen aus unserer Menge $\{1, \dots, p - 1\}$ den Wert p ergeben, was gleich null wäre. Vielmehr ist das Ergebnis stets ungleich null, wenn keiner der Beteiligten gleich null ist. Die Rechnerei ist etwas gewöhnungsbedürftig: Modulo $p = 7$ ist $2 \cdot 4 = 8 = 1$, also ist $\frac{1}{2} = 4$ und $\frac{1}{4} = 2$, aber es führt nicht zu Widersprüchen.

Auch das Potenzieren modulo p , also $b^n = b \cdot \dots \cdot b$ mit n Faktoren b , führt niemals auf den Wert null. Vielmehr tanzen die Potenzen b, b^2, b^3, \dots wild im Kreis herum, bis sie nach spätestens $p - 1$ Schritten bei der Eins landen. Wieso? Es stehen nur $p - 1$ Werte überhaupt zur Auswahl. Falls die Folge der Potenzen von b einen dieser Werte zweimal annimmt, also $b^n = b^m$ für verschiedene Potenzen n und m , dann könnte man diese Gleichung durch b^m dividieren mit dem Ergebnis $b^{n-m} = 1$, also landet die Folge schon früher, nämlich bei der Nummer $n - m$ bei der Eins. Wenn das nicht passiert, wenn also die Potenzen von b den Zahlenkreis voll ausschöpfen, nennt man b ein primitives Element, und das ist der interessante Fall. Dann nämlich vollführen die b -Potenzen die chaotischste überhaupt denkbare Bewegung, und es ist am schwierigsten, die Gleichung $b^n = c$ nach n aufzulösen, also aus dem b^n das n zu erschließen.

Epizykloiden

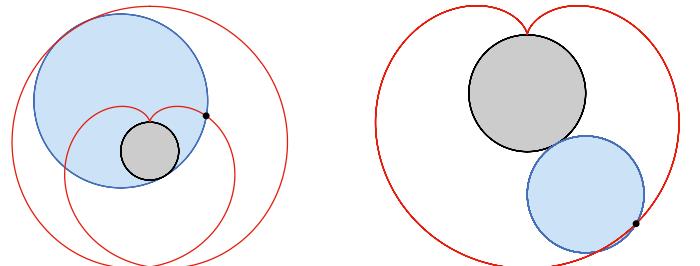
Die Zahlen von 1 bis $p - 1$ sind gleichmäßig auf dem Rand des Einheitskreises angeordnet. Die Zählung beginnt oben und läuft gegen den Uhrzeigersinn. Zu der Zahl n gehört der Winkel $x = 2\pi \cdot n/(p - 1)$, und der zugehörige Punkt hat die Koordinaten $(\sin x, \cos x)$. Ein Strich, der x mit bx verbindet, geht also von $(\sin x, \cos x)$ nach $(\sin bx, \cos bx)$ und ein nahe benachbarter Strich von $(\sin(x + h), \cos(x + h))$ nach $(\sin(b(x + h)), \cos(b(x + h)))$.

Um die Kurve zu bestimmen, an der alle diese Striche Tangenten sind (die »Einhüllende«), berechnet man den Schnittpunkt der beiden benachbarten Striche in Abhängigkeit von x und h und lässt h gegen 0 gehen. Am Ende einer umfangreichen Rechnung steht die vergleichsweise einfache Formel

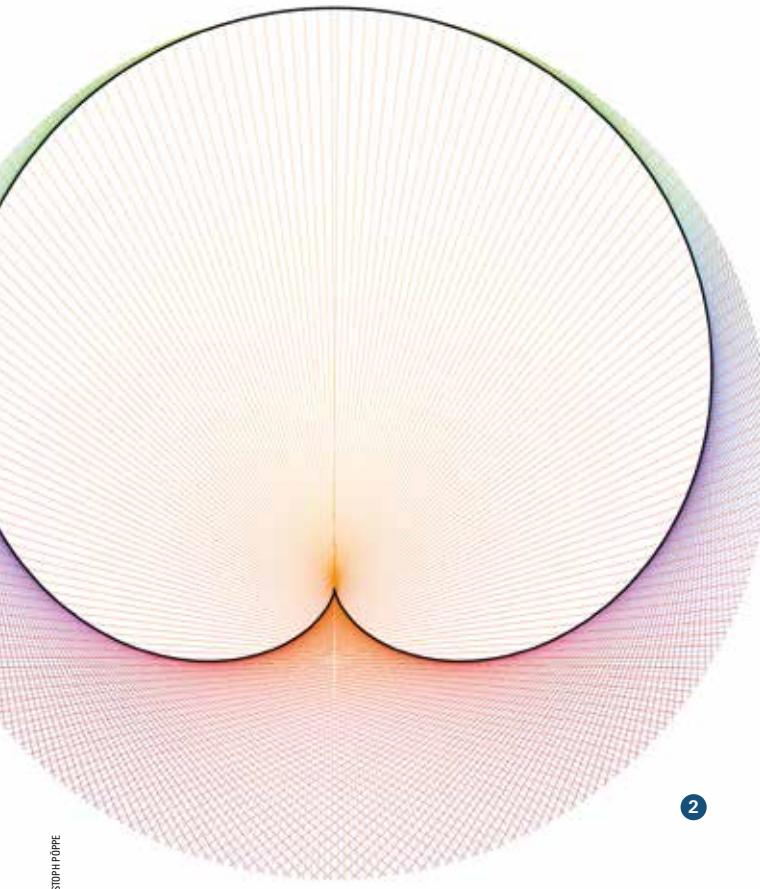
$$f(x) = \frac{b}{b+1}(\sin x, \cos x) + \frac{1}{b+1}(\sin bx, \cos bx).$$

Der zweite Term beschreibt die Rollbewegung des bewegten (äußeren) Kreises. Der hat den Radius $1/(b+1)$

und läuft mit der b -fachen Geschwindigkeit des ersten Terms. Dieser beschreibt nicht den ruhenden inneren Kreis, auf dem der äußere abrollt, sondern den Mittelpunkt des äußeren Kreises. Der innere hat also den Radius $(b-1)/(b+1)$.



Für $b = 2$ (links) sind der innere (grau) und der äußere Kreis (blau) gleich groß. Die Epizykloide, die der Schreibstift (schwarzer Punkt) zeichnet, ist in diesem Fall eine Kardioide (rot). Für $b = \frac{2}{3}$ (rechts) rollt der äußere Kreis mit seiner Innenseite auf dem inneren ab.



CHRISTOPH RÖPKE

Im Körper der ganzen Zahlen modulo p , so die offizielle Bezeichnung unseres Zahlenkreises, ist das Exponentieren – berechne b^n für festes b und variables n – einfach; die Umkehrung, der »diskrete Logarithmus«, dagegen schwer. Unter den reellen Zahlen konnte man herumprobieren und sich dank der Stetigkeit der Logarithmusfunktion an das richtige Ergebnis heranschleichen. Beim diskreten Logarithmus bleibt von der Stetigkeit nichts übrig. Man kann die Lösung der Gleichung $b^n = c$ zwar durch Probieren finden; es gibt auch nur endlich viele Möglichkeiten. Aber wenn p richtig groß ist – sagen wir 1000 Dezimalstellen –, wächst der Zeitaufwand ins Astronomische.

Die Funktion zu berechnen ist einfach, ihre Umkehrung ist schwer bis zur Undurchführbarkeit: Solche »Einwegfunktionen« sind die Basis der modernen Kryptografie (siehe »Spektrum« Mai 1995, S. 46). Damit ein Geheimnis auch wirklich gewahrt bleibt, sollte der Tanz der b -Potenzen durch den Einheitskreis maximal chaotisch ablaufen, also keine Struktur zeigen, an die ein Hacker zum Entschlüsseln anknüpfen könnte.

Und wie sieht der Tanz nun aus? Die Bilder dieses Artikels zeigen die Folge $b, b^2, b^3 \dots$, wobei alle Zahlen von 1 bis $p - 1$ der Reihe nach auf dem Rand des Kreises angeordnet sind. Jedes Folenglied ist mit seinem Nachfolger durch einen geraden Strich verbunden.

Fangen wir klein an, mit $b = 2$ ②. Von Strukturlosigkeit kann keine Rede sein! Vielmehr sind die Strecken von b^n nach b^{n+1} Tangenten an eine Kurve, die als Kardioide (»Herzkurve«) bekannt ist. Sie sieht einem echten Herzen weitaus weniger ähnlich als einem anderen Körperteil; aber vermutlich hätte ihr Namensgeber Johann

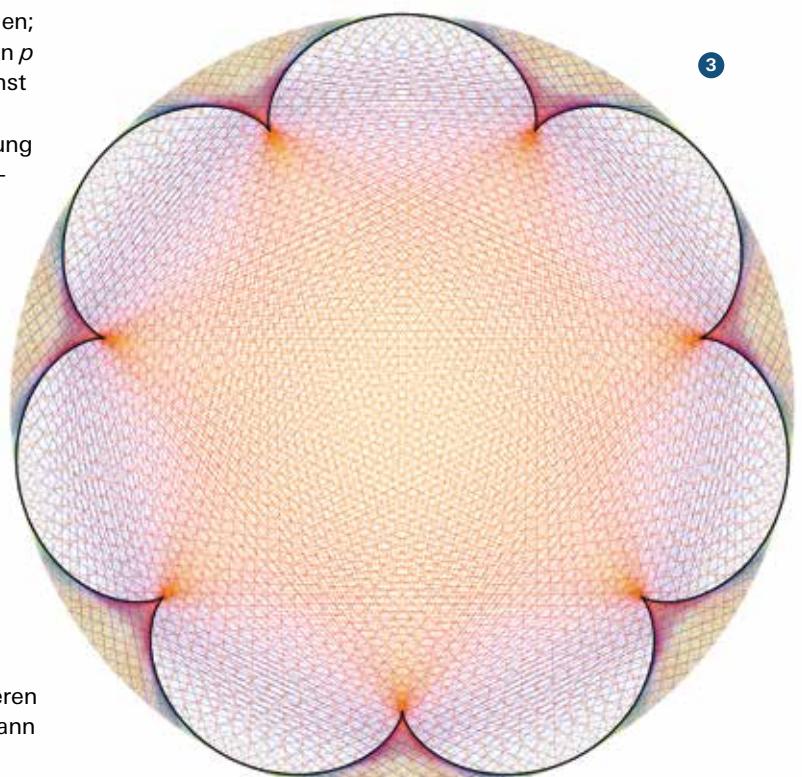
AN EINER KARDIOIDE (schwarze Kurve) sind für $b = 2$ die Striche von n nach bn Tangenten. Dabei kommt es auf den Wert von p (hier 401) nicht besonders an.

Castillon (1708–1791) einen Namen wie »Popoide« unseriös gefunden. Die Kardioide ist eine Epizykloide, das heißt, sie entsteht, wenn ein Kreis, an dessen Umfang ein Zeichenstift befestigt ist, auf einem anderen abrollt. Sie bildet den Hauptkörper der berühmten Mandelbrot-Menge und hat auch sonst allerlei interessante Eigenschaften (siehe »Spektrum« Mai 2007, S. 94).

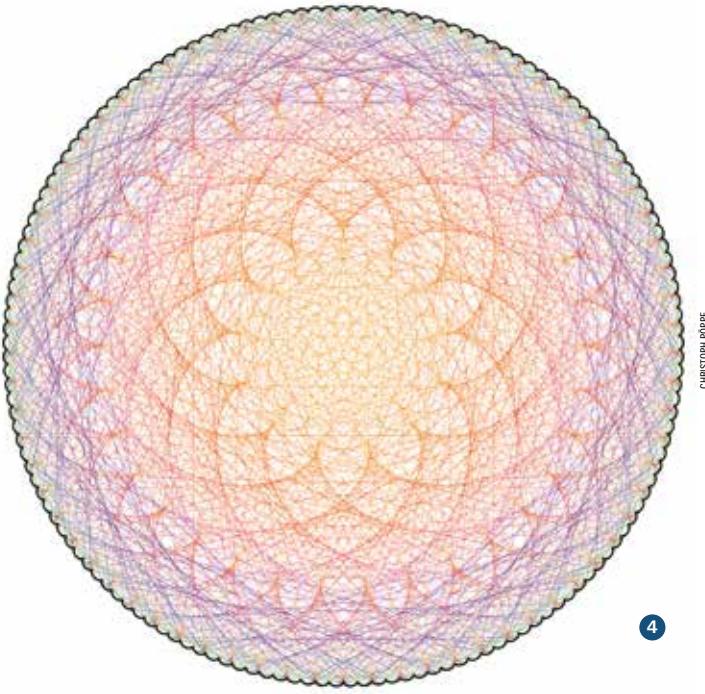
Ähnliche Rollkurven finden sich auch für andere Zahlenwerte von b ③. Mit wachsendem b wird der innere Kreis immer größer und der äußere, der auf ihm abrollt, hingegen immer kleiner. Insgesamt passen beide Kreise gerade in das Innere des umfassenden Einheitskreises. Der äußere macht entsprechend mehr Runden, bis er an seinen Ausgangspunkt zurückkehrt, was sich durch eine größere Anzahl einwärts gerichteter Spitzen bemerkbar macht – um genau zu sein, sind es $b - 1$ Stück (siehe »Epizykloiden«). Was für kleine Werte von b noch ins Auge springt, wird zu einer kaum noch sichtbaren Girlande am äußersten Rand des Einheitskreises, wenn b in die Größenordnung von einigen hundert gerät ④.

Diese Struktur wird also allmählich bis zur Bedeutungslosigkeit an den Rand gedrückt, wenn die Zahl b nicht allzu klein ist. Aber in dem frei werdenden Platz erscheint neue Struktur! Mehrere Schichten aus gotisch anmutenden Spitzbögen füllen die Fläche ①.

DIE ROLLKURVE hat für $b = 8$ und $p = 1009$ insgesamt $b - 1 = 7$ einwärts gerichtete Spitzen.



CHRISTOPH RÖPKE



CHRISTOPH POPPE

4

DIE AN DEN RAND GEDRÄNGTE Rollkurve fällt für $b = 150$ und $p = 1009$ kaum noch auf. Für die prominenten Spitzbögen im Inneren muss man andere Gründe suchen.

Mit diesen Bildern hat sich der französische Mathematiker Simon Plouffe intensiv befasst. Bekannt geworden ist er als Erfinder eines Verfahrens namens »Tröpfel-Algorithmus«, mit dem man zum Beispiel die hunderttausendste Stelle der Kreiszahl π bestimmen kann, ohne alle vorherigen Stellen ausrechnen zu müssen (siehe »Spektrum« Dezember 1995, S. 10). In neuerer Zeit hat er seiner Liebe zu umfangreichen (Computer-)Berechnungen neuen Ausdruck gegeben, indem er die Struktur von b^n modulo p an zahlreichen Beispielen erforschte.

Um zu verstehen, wie die Spitzbögen zu Stande kommen, ist es hilfreich, vorübergehend von der Forderung abzugehen, dass p eine Primzahl sein muss. Darf p nämlich weitere Teiler haben außer 1 und sich selbst, ergeben sich Überraschungen. Wenn insbesondere $b - 1$ ein Teiler von p ist, es also eine natürliche Zahl k gibt, so dass $p = k(b - 1)$ ist, dann entsteht ein Muster von konzentrischen Kreisen 5. Wieso? Wir schreiben die Zahl n als $ku + v$, wobei v zwischen 0 und $k - 1$ liegt. Für $k = 10$ wäre v die letzte Ziffer in der gewöhnlichen Dezimaldarstellung von n . Entsprechend kann man eine natürliche Zahl n durch k dividieren; dann ist u das Ergebnis und k der Rest. Die Differenz $bn - n = (b - 1) \cdot n$ schreibt sich dann als $(ku + v)(b - 1) = k(b - 1)u + v(b - 1) = pu + v(b - 1)$. Modulo p gerechnet, fällt der erste Term weg, also kommen für die Differenz $bn - n$ überhaupt nur k verschiedene Werte vor, einer für jeden Wert von v . Die Differenz $bn - n$ ihrerseits bestimmt die Länge des Strichs im Einheitskreis und diese wiederum dessen minimalen Abstand vom Kreismittelpunkt. Diese minimalen Abstände sind die Radien der Kreise, die so auffällig ins Auge springen.

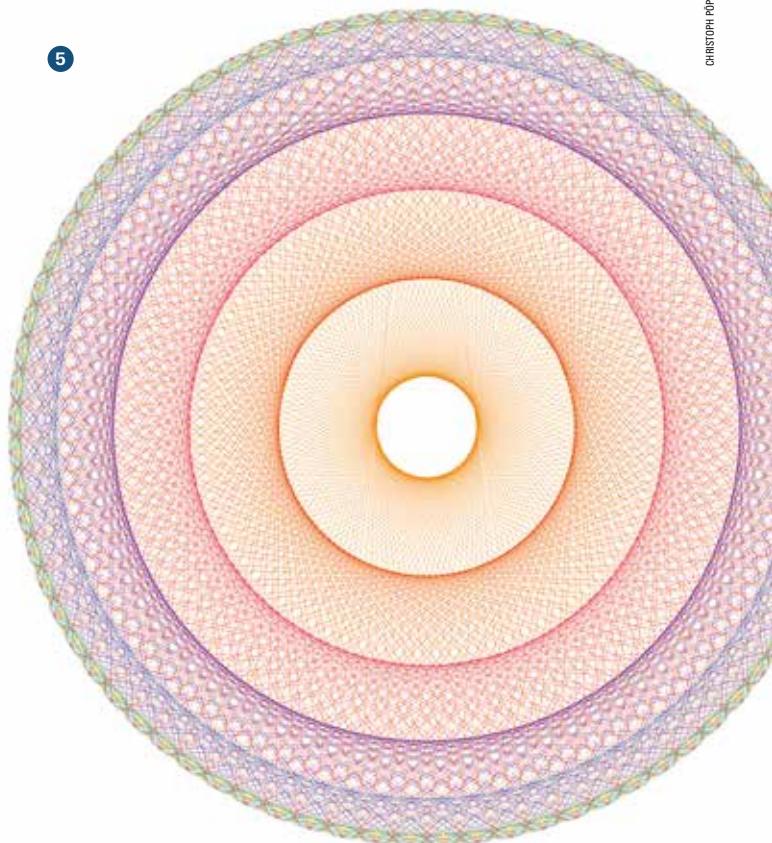
Setzen wir jetzt b eins höher, so ergibt sich ein deutlich erkennbares Spitzbogenmuster 6. Auch für diesen Fall hilft die Zerlegung von n zur Basis k . Wenn man nämlich jeden Strich entsprechend seinem v -Wert einfärbt, stellt sich heraus, dass das ganze Muster in k gegeneinander verdrehte Kardioden zerfällt, eine für jeden Wert von v . Wenn man b weiter erhöht, wird aus der Kardioide eine zweispitzige Rollkurve (»Nephroide«, 7), dann eine dreispitzige und so weiter, bis auch diese Muster sich im Gewirr der Striche am Rand des Einheitskreises verlieren.

Anders ausgedrückt: Wenn man von allen möglichen Werten von n nur jeden k -ten verwendet, passt das Muster in das Schema mit den einfachen Rollkurven, das für kleine Werte von b funktioniert. An Stelle von $p - 1$ Punkten auf dem Rand des Einheitskreises wären es nur noch $p/k - 1$ Stück, so dass dieselben Überlegungen wie oben mit dem Modul p/k statt p funktionieren, für jede der k Teilmengen von Punkten ein bisschen anders verdreht.

Entsprechend kann man auch den Wert von b verkleinern, aber man darf es nicht einfach durch b/k ersetzen. Vielmehr tritt für den Fall, dass b um 2 größer ist als ein Teiler von p , an die Stelle von $b - 2$ die Zahl $(b - 2)/k$. Das neue b wäre dann also $(b - 2)/k + 2$, entsprechend für die anderen Rollkurven.

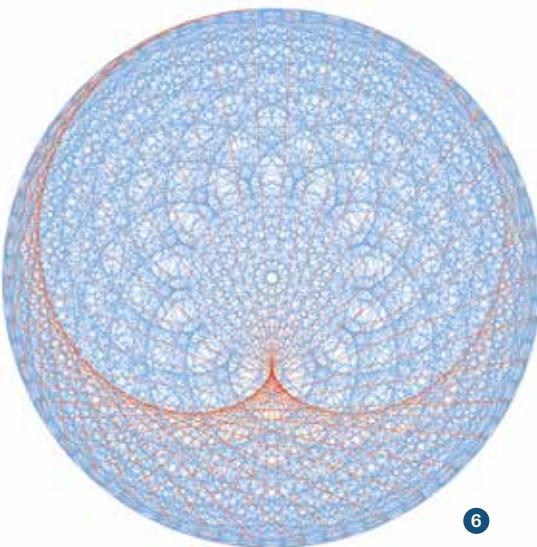
Auch diese Überlegung erklärt noch längst nicht alle Spitzbogenmuster. Nehmen wir den Fall $p = 1001$ und $b = 31$. Es ergibt sich wieder ein Muster mit elf Spitzen 8. In der Tat ist 11 ein Teiler von $1001 = 7 \cdot 11 \cdot 13$; aber der Wert

DAS MUSTER konzentrischer Kreise kommt zu Stande, weil für $p = 1001$ und $b = 78$ der Wert $b - 1$ ein Teiler von p ist, denn $1001/77 = 13$.

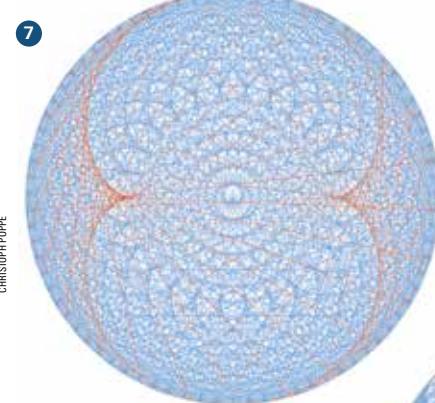


CHRISTOPH POPPE

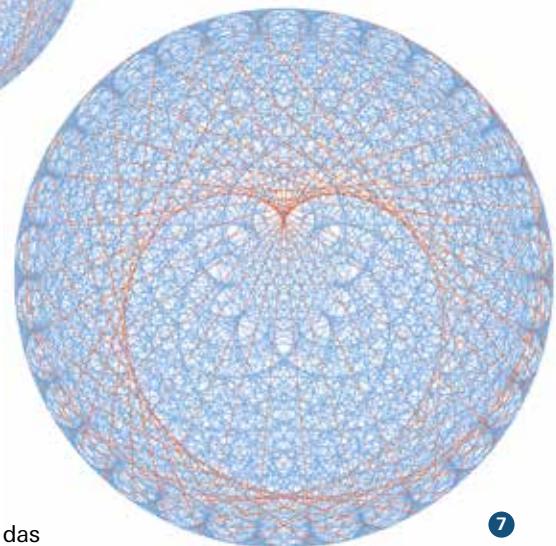
5



JE EINE KARTIOIDE hüllt die 13 Teile ein, aus denen das Muster für $p = 1001$ und $b = 79$ besteht. Das tritt deutlich zu Tage, indem die Striche für alle durch 13 teilbaren Werte von n rot und im Übrigen blau gefärbt werden.



EINE SCHAR von (zweispitzigen) Nephroiden an Stelle der Kardioiden ergibt sich für $p = 1001$ und $b = 80$.



$b = 31$ ist viel zu groß, als dass man damit wie oben ein Muster erklären könnte. Theoretisch müsste eine 19-spitzige Rollkurve erscheinen. Praktisch sieht man sie nicht: Gibt es zu wenig Striche, die Tangenten an eine solche Kurve sind, fällt sie einem nicht auf.

Klarheit kommt in die Sache, wenn man zunächst nicht jeden elften Punkt betrachtet, sondern nur jeden dreißigsten. Denn $31 \cdot 33 = 1023 = 1001 + 22 = 22 \bmod p$. Das sind zwei Drittel von 33. Wenn wir jetzt wie oben von p zu $p/11$ übergehen, dann ergibt sich eine Rollkurve ungewohnter Art.

In den bisherigen Fällen macht der bewegte Kreis genau $b - 1$ Runden, bevor er an seinen Ausgangspunkt zurückkehrt: eine für die Kardioide, zwei für die zweispitzige Nephroide und so weiter. Diesmal sind es zwei Drittel Runden! Entsprechend braucht er auch zwei Umläufe um den großen Kreis, bis sich die Kurve wieder schließt. Unterwegs überschneidet sie sich mehrfach (rechtes Bild im Kasten »Epizykloiden«). Das Bild für $p = 1001$ und $b = 31$ besteht also aus den Tangenten an elf solche Zweidrittel-Epizykloiden.

Das sind einige Möglichkeiten, die Struktur dieser merkwürdigen Muster zu erklären, aber mit ziemlicher Sicherheit nicht alle. Andererseits können auf ein gegebenes Paar von Parametern p und b mehrere unter den Zusammenhängen zutreffen, die ein gewisses Muster nach sich ziehen. Welches von diesen Mustern tatsächlich in auffälliger Form sichtbar wird, ist bislang ebenso unklar wie die Frage, ob und wie diese Ergebnisse auf den interessanteren Fall, dass p eine Primzahl ist, auszudehnen sind. Simon Plouffe hat aus seiner reichhaltigen Bildersammlung ein paar Erfahrungsregeln hergeleitet, aber noch keine Begründung dafür. Es bleibt also noch viel auszuprobieren. Vielleicht lassen sich die Erfahrungen dann zu einer umfassenden Theorie ausarbeiten.

AUS ELF TEILEN setzt sich das Bild für $p = 1001$ und $b = 31$ zusammen. In jedem von ihnen fügen sich die Striche zu einer exotischen Rollkurve, der ein b -Wert von $\frac{2}{3}$ entspräche.

Selbst wenn das gelingen sollte, muss man sich allerdings über die Sicherheit der gängigen Verschlüsselungen keine ernsthaften Sorgen machen. Selbst eine Zahl wie $p = 10037$, die dem Bild 1 zu Grunde liegt, ist für die Maßstäbe der Kryptografen noch geradezu lächerlich klein. Für hinreichend große Primzahlen p – sagen wir 1000 Dezimalstellen – bleibt das Problem des diskreten Logarithmus schwer. Ein Bild nach der Art der hier gezeigten zu berechnen, würde das Problem zwar lösen; aber die dafür benötigte Rechenzeit wäre größer als die bisherige Lebensdauer des Universums. ▲

QUELLE

Plouffe, S.: The shape of $b^n \bmod p$, 2020
<http://plouffe.fr/Inverseofprimes/The%20shape%20of%20b%5en%20mod%20p.pdf>

WEBLINKS

Simon Plouffe: Inverse of Primes
<http://plouffe.fr/Inverseofprimes/>

Überaus reichhaltige Bildersammlung

Mathias Lengler: Interactive »Times Table«
<https://lengler.dev/TimesTableWebGL/>

Nathan Nieuwenhuizen: The Heart
<https://nathannieuwenhuizen.github.io/PlayableBuilds/theHeart/index.html>

Auf beiden Websites kann man b und p frei wählen und automatisch variieren lassen.

Dave Richeson: I Heart Cardioids
<https://divisbyzero.com/2018/04/02/i-heart-cardioids/>

Allerlei Wissenswertes über die Kardioide

ARCHÄOLOGIE DIE OPFERGRUBEN VON SANXINGDUI

Im Südwesten Chinas haben Menschen vor rund 3200 Jahren massenhaft Kunstwerke in Erdgruben vergraben – vermutlich als Gaben an ihre Götter. Doch wozu die vielen Objekte einst dienten und welche Zivilisation sie gefertigt hatte, stellt Archäologen noch vor Rätsel.



Der Wissenschaftsjournalist **Hubert Filser** ist studierter Physiker und Autor zahlreicher Sachbücher und Artikel über Archäologie.

► spektrum.de/artikel/2021602

AUF EINEN BLICK JADE, GOLD UND ELFENBEIN

- 1** Acht Opfergruben haben Archäologen in Sanxingdui in der chinesischen Provinz Sichuan entdeckt, sechs davon legten sie inzwischen frei. Der Fundplatz stammt aus der Zeit von zirka 1200 bis 1000 v. Chr.
- 2** Die Erdgruben waren randvoll mit Skulpturen, Gefäßen und Geräten aus Gold, Bronze und Jade. Obenauf lagen dutzende Elefantenstoßzähne.
- 3** Über die Menschen von Sanxingdui ist bisher wenig bekannt. Sicher ist: Es handelte sich um eine weit entwickelte bronzezeitliche Gesellschaft, die bezeugt, dass die chinesische Kultur nicht allein in Zentralchina entstanden ist.



ZHOU BO / IPIC / DPA / PICTURE ALLIANCE



BRONZEKOPF Dreieckige Augen, große Ohren, kantige Gesichtszüge – der Kopf aus Bronze zeigt die für die Sanxingdui-Kultur typischen Stilformen. Das Gesicht ist mit einer dünnen Goldfolie belegt. Die Skulptur kam in einer der acht großen Opfergruben ans Licht.

Zum Schluss schleppten die Menschen aus Sanxingdui noch etwas Besonderes zum Opferplatz: dutzende Stoßzähne männlicher Elefanten. In meterhohen Feuern sangten sie jeden davon an. Dann legten sie die Stoßzähne in die Erdgrube, in der sie bereits zahlreiche kunstvolle Gefäße, Skulpturen und Geräte aufeinandergeschichtet hatten. Ganz unten hin kamen kleinere Objekte, bis diese den gesamten Boden der rechteckigen Vertiefung bedeckten. Als Nächstes holten die Menschen schwere Bronzeköpfe von hölzernen Stelen, die unweit der Grube standen. Die überlebensgroßen Bildnisse gelangten ebenfalls in die Erde – und schließlich die wuchtigen Stoßzähne. »Das alles waren Gaben für eine höhere Macht«, sagt Jay Xu, Direktor des Asian Art Museum in San Francisco und Experte für die Opfergruben von Sanxingdui (sprich »Sanschingdui«), einem Ort in der Provinz Sichuan im heutigen Südwesten Chinas.

»Sanxingdui war vor mehr als 3000 Jahren eine der größten Städte Ostasiens«, erklärt Xu weiter. Für Archäologen ist inzwischen klar, dass der Fundplatz ein Machtzentrum in der Tiefebene von Sichuan bildete. Zudem beheimatete es eine eigenständige, frühbronzezeitliche Kultur, die sich völlig von den Siedlungen Zentralchinas unterschied – dort, wo Fachleute lange Zeit die Wiege der chinesischen Kultur wählten. Die Funde aus Sanxingdui lassen nun an dieser Idee zweifeln.

1929 hatte ein Bauer die ersten Stücke entdeckt, als er einen Brunnen grub und dabei Jadegefäß aus der Erde holte. Das meiste verkaufte er an private Händler. Chinesische Archäologen suchten daraufhin die rund 40 Kilometer nördlich der Millionenstadt Chengdu gelegene Region immer wieder ab, stießen aber auf keine weiteren Hinweise auf die Kultur von Sanxingdui. Erst 1986 fanden Arbeiter

OPFERPLATZ FÜR HÖHERE MÄCHTE Am Fundort Sanxingdui nördlich der Millionenstadt Chengdu in der Provinz Sichuan stießen Archäologen auf große Gruben, die in der Bronzezeit mit zahlreichen Kunstwerken gefüllt wurden.



zufällig bei Bauarbeiten die beiden ersten rechteckigen Vertiefungen voller Opfergaben.

2021 berichteten die Ausgräber in einer Fachzeitschrift der Chinesischen Akademie der Wissenschaften von sechs weiteren Gruben. Und womöglich schlummern in der Erde von Sanxingdui noch mehr derartige Anlagen.

Der Boden der kleinsten Grube mit der Grabungsnummer 5 misst 5 Quadratmeter in der Fläche; die größte, Nummer 8, umfasst 20 Quadratmeter. Die Tiefe reicht von einem halben bis zwei Meter. Von den bisher acht identifizierten Anlagen, von denen zwei bereits 1986 ausgegraben wurden, haben die Archäologen bis zum März 2021 vier weitere frei gelegt. Alle waren randvoll mit hunderten Artefakten aus Gold, Bronze, Jade und Ton; es handelt sich um Gefäße, Skulpturen, Masken, Geräte und die erwähnten Stoßzähne.

Meisterwerke der chinesischen Bronzezeit

Es sind spektakuläre Funde – darunter etwa die Bronzefigur eines knienden Mannes mit aufgestellten Haaren und übergrößen Händen (siehe »Kniender«, S. 85) ein mehrteiliger Bronzealtar und eine Maske mit gelängten Ohren aus dünnem Goldblech. Darüber hinaus legten die Archäologen gegossene Bronzeköpfe frei, jeweils anderthalb Meter hoch mit kantigen Gesichtszügen, stabartigen Augen und abstehenden Ohren. Bei den ersten Grabungen im Jahr 1986 holten die Forscher auch eine 2,6 Meter große Bronzestatue aus der Erde. In den Händen der Figur war wohl einst ein Elefantenstoßzahn eingelassen. Das größte Fundstück dürfte eine fast vier Meter hohe Baumskulptur aus Bronze sein. Sie ist verziert mit Blumen, Ornamenten und in der alten chinesischen Kultur seltenen Mischwesen, halb Mensch, halb Vogel. Kurzum: Die Objekte aus den sechs Opfergruben stammen von einer Kultur, die während der chinesischen Bronzezeit Meisterwerke hervorgebracht hat.

Schon als Arbeiter die ersten beiden Gruben entdeckt hatten, waren die Archäologen angesichts der Fülle an Funden einer bis dahin völlig unbekannten Kultur erstaunt. Stil und Art der meisten Kunstwerke unterschieden sich von den Stücken anderer Regionen. Offenbar hatte es neben den Zivilisationen am Mittellauf des Gelben Flusses, wo später die erste chinesische Kaiserzeit ihren Anfang nahm, im Südwesten des Landes ebenfalls eine fortgeschrittene Kultur gegeben, so das Fazit der Forscher. Dort, im fruchtbaren Sichuan-Becken, hatten vor mehr als 3200 Jahren Menschen in größeren Siedlungen gelebt. »Es war eine hoch entwickelte Kultur«, sagt Jay Xu, der viele Objekte aus den ersten beiden Gruben untersucht hat.

Die neuen Anlagen belegen nun, dass die Zeremonien »offenbar Aktivitäten waren, die in regelmäßigen Abständen abgehalten wurden«, sagt Anke Hein, Professorin für Chinesische Archäologie an der University of Oxford. Auch wenn sich nicht im Detail rekonstruieren lässt, was rund um die Opfergruben vor mehr als 3000 Jahren geschah, so sind sich die Experten weltweit inzwischen einig, dass es für die damalige Gesellschaft bedeutsame Riten gewesen sein müssen.

Die Objekte entstanden in einem relativ kurzen Zeitraum, vermutlich innerhalb von ein oder zwei Jahrhunderten. Die Ausgräber haben aus Grube 4 dutzende organische Proben

GRABUNG Um den Befund nicht zu verunreinigen, gehen die Archäologen in Schutzanzügen zu Werk. Über den Gruben ließen sie zudem einen großen Schutzbau errichten. So können sie die Objekte bei gleich bleibender Feuchtigkeit und Temperatur frei legen.



LEBENSBAUM In einer Grube war eine Baumskulptur vergraben. Sie wurde restauriert und im Museum von Sanxingdui ausgestellt.



gewonnen und diese per Radiokarbonmethode datiert. Demnach gelangten die Stücke in der Zeit zwischen 1200 und 1000 v. Chr. in die Erde. Zudem ähneln sich die Gefäße und Figuren aus allen geöffneten Gruben in Machart und Material. Entsprechend können sie nicht in allzu großem zeitlichem Abstand voneinander gefertigt worden sein.

Eine Besonderheit haben alle Gruben gemeinsam: Die Gegenstände darin waren verbrannt oder bewusst zerstört worden, ehe man sie schichtweise ins Erdreich legte. Die Stoßzähne waren angeschmolzen, die Bronzefiguren verbogen oder durch die Hitze deformiert. »Durch Verbrennen wird etwas Menschliches in etwas Überirdisches verwandelt«, sagt Xu. Auch aus anderen Kulturen kennen Archäologen dieses Phänomen: Um Dinge unwiderruflich an eine Gottheit zu übergeben, mussten sie untauglich gemacht werden. Und dass hier übernatürliche Mächte beschworen werden sollten, darauf deuten die Goldmasken und Bronzeköpfe hin, deren übersteigerte Gesichter mit ihren großen Augen und Ohren wohl keine naturalistischen Menschenbilder darstellten. »Wen die Bildnisse zeigen sollen, weiß man noch nicht genau – vielleicht Ahnen, Gottheiten oder einen Stammvater«, erklärt der Archäologe und China-experte Patrick Wertmann von der Universität Zürich. Vermutlich opferten die Menschen von Sanxingdui ihren wertvollsten Besitz – Stücke, die für die Gemeinschaft einen hohen ideellen Stellenwert besaßen. »Es waren keine Alltagsgegenstände, sondern vermutlich Kultobjekte«, fügt Wertmann hinzu.

Galten Elefanten als Götter?

Die vielen Neufunde begeistern auch internationale Experten wie den US-Archäologen Rowan Flad von der Harvard University. »Wir haben durch die sechs neuen Gruben nun so viel mehr Material vorliegen, um mehr über die Rituale selbst und ihre Bedeutung herauszufinden«, sagt Flad. Ihn interessiert, warum verschiedene Dinge schichtweise niedergelegt wurden und was es mit der obersten Lage auf sich hat: den Elefantenstoßzähnen. In einer Grube fanden die Ausgräber 80 Stück davon – ein enorm wertvolles Gut. Denn nur männliche Elefanten entwickeln solche meterlangen Hauer aus Elfenbein. Sie zu jagen und dann eine derart große Menge in eine Opfergrube zu verfrachten, belegt Flad zufolge die große Machtfülle der damaligen Menschen. Die Jagd auf Elefanten, die sich vermutlich über weite Gebiete erstreckte, habe ein hohes Maß an Organisation erfordert.

Überhaupt müssen die Dickhäuter eine wichtige Rolle gespielt haben. Davon ist auch Patrick Wertmann überzeugt. Er betont, dass Elefanten damals in der Provinz Sichuan heimisch waren. In der Region südwestlich der Provinz streifen sie heute noch umher. Vermutlich, so der Archäologe, verehrten die Menschen von

Sanxingdui die Tiere kultisch. Wertmann verweist auf die große Statue, in deren Handöffnungen vielleicht einst ein Stoßzahn lag. Auf dem Sockel der Figur sind Elefantenschädel abgebildet. Womöglich stellte das Männerbildnis eine Art Elefantengott dar.

Reichtum, kunstvolle Objekte, die Fähigkeit, Metalle wie Gold oder Legierungen wie Bronze zu verarbeiten, ein großes Maß an Organisation – all das sind Indizien für eine hoch entwickelte Kultur. Form und Dekor der Gegenstände waren überdies einzigartig im damaligen China, zudem sind sie anders gestaltet als viele bekannte Funde aus den zentralchinesischen Regionen um den Gelben Fluss. Und so schlägt die Begeisterung in China derzeit große Wellen.

»Das öffentliche Interesse ist enorm«, sagt Lothar von Falkenhausen, Professor für Chinesische Archäologie an der University of California in Los Angeles, ein Experte für die chinesische Bronzezeit. Neue Museen etwa im Stadtviertel Jinsha der Provinzhauptstadt Chengdu sind entstanden. Das Staatsfernsehen berichtete im März 2021 tagelang live von den Grabungen in Sanxingdui, wie Patrick Wertmann weiß.

Die neuen Funde werden in China als eine der wichtigsten Entdeckungen des Landes eingestuft, wichtiger als die Terrakotta-Armee im Grab des ersten Kaisers. Die Regierung habe den Ort auf Grund der aktuellen Ausgrabungen

KNIENDER Die Bronzefigur eines Mannes mit aufragendem Haar lag in Opfergrube Nummer 4. Zwischen den Händen war einst ein weiteres Objekt befestigt.



WANG XI / XINHUA NEWS AGENCY / PICTURE ALLIANCE

als vorrangig eingestuft, Archäologen aus dem ganzen Land sind dorthin beordert worden, erzählt Anke Hein, die engen Kontakt zu chinesischen Forschenden pflegt. Mehr als 120 Wissenschaftler arbeiten derzeit an der Ausgrabungsstätte.

Archäologie chinesischer Machart

Auch sonst werden Grabungen und Denkmalschutz in China von höchster Stelle vorangetrieben: In den vergangenen zwei Jahren ließ Staatspräsident Xi Jinping immer wieder verlautbaren, die Archäologie solle nicht nur die Kulturgeschichte erforschen, sondern sei überdies politisch und gesellschaftlich bedeutsam. China stellt den Wissenschaftszweig also ganz in den Dienst seiner Staatsideologie. Laut der staatlichen Nachrichtenagentur Xinhuanet sagte Xi, dass die Grabungsfunde den Ursprung und die Entwicklung der chinesischen Kultur, deren ruhmreiche Errungenschaften sowie großartige Beiträge zur Kultur dieser Welt offenbaren würden. Dafür brauche es eine Archäologie chinesischer Machart und Überzeugung. »Wie die genau aussieht, daran wird derzeit noch gearbeitet«, sagt Patrick Wertmann. »Aber sicher ist: In China wird die Archäologie extrem gefördert.«

In internationalen Fachzeitschriften und offiziellen Grabungsberichten ist aus Sanxingdui bislang praktisch nichts publiziert. Lediglich ein paar chinesische Websites und Diskussionsforen zeigen Bilder der neuen Funde. Dort tauschen sich Experten und interessierte Laien vor allem über die Gold- und Bronzeobjekte sowie deren Entstehung aus – mit bisweilen nicht ganz ernst gemeinten Annahmen: Die Masken mit ihren schrägen Augen und großen Ohren etwa wären ein Beweis für den Besuch von Außerirdischen.

Forscher wie Rowan Flad oder Lothar von Falkenhausen haben zumindest bei Onlinekonferenzen von neuen Erkenntnissen erfahren. So berichtet Flad, dass die Archäolo-

gen mehr über die Siedlung jenseits der acht Opfergruben und ihre Stellung in der Region herausgefunden haben. Ihr Ziel ist es, zu verstehen, wie die Gesellschaft strukturiert war, ob es eine Elite in Sanxingdui gab und welche Beziehungen die Menschen zu ihren Nachbarn hatten. Mittlerweile ist klar, dass die Bewohner in engem Austausch mit anderen Kulturen standen. Die Technik, mit der sie Gefäße und Skulpturen aus Bronze gegossen haben, stammt aus dem mittleren Jangtse-Becken, aus den heutigen Provinzen Hubei und Hunan. Viele Behälter waren von dort nach Sanxingdui gelangt, wo die Handwerker sie auch umgestaltet. Ebenso lassen die Jadegefäß und Töpferwaren auf Handelsbeziehungen schließen, diesmal eher mit nördlich gelegenen Regionen. Immer wieder, so scheint es, haben die Menschen aus Sanxingdui Gegenstände importiert und sie entsprechend ihren Bedürfnissen genutzt.

Vor Ort suchen die chinesischen Archäologen nach weiteren Spuren dieser Kultur – etwa nach herausgehobenen Gebäuden, Palästen oder Friedhöfen. Nahe dem Fluss entdeckten die Forscher die soliden Fundamente größerer Bauwerke: Der Untergrund war dort stellenweise stark verfestigt worden. Daraus schließt Flad, dass die Gebäude einst bis zu 65 Meter lang waren. Die Höhe der

ELEFANTENGOTT? Die mehr als zweieinhalb Meter hohe Männerfigur (rechts) hielt vielleicht einst einen Stoßzahn in Händen. Auf dem Sockel sind Elefantenschädel dargestellt. Es könnte sich um das Bildnis eines Elephantengotts handeln.

STIELAUGEN An dem überlebensgroßen Kopf aus Bronze stehen die Ohren ab, der Mund ist breit gezogen, und die Pupillen treten weit hervor. Welches Wesen dargestellt sein soll, ist unbekannt.





Bauten lässt sich nicht mehr genau erschließen, doch an anderen Orten der Region hatten recht sicher mehrgeschossige Gebäude gestanden. Zudem stießen die Ausgräber auf Spuren von Werkstätten, wo Handwerker Bronze oder Gold verarbeiteten.

Bei den jüngsten Grabungen kamen auch erstmals Reste von Seide ans Licht, mehr als 3000 Jahre alt. Die Funde sind eine kleine Sensation, denn das feine Gewebe zerfällt meist innerhalb von wenigen Jahrzehnten in der Erde. »Das ist eine großartige Entdeckung«, bestätigt Patrick Wertmann. »Bisher gab es weder Belege für Seide in Sanxingdui noch zeitgleiche Funde aus dieser Region Chinas – dabei gilt heute im Land gerade die Provinz Sichuan als einer der Ursprungs-orte der Seidenproduktion.«

Inzwischen haben die Archäologen die Überreste einer fast sieben Kilometer langen Stadtmauer ausgegraben. Die mächtige Lehmfeste, deren Fundamente noch an einigen Stellen erhalten sind, liefert eine grobe Vorstellung davon, wie groß die Stadt war: Mindestens drei Quadratkilometer dürfte das umwallte Gebiet umfasst haben, eine enorme Fläche für eine Stadt in der Bronzezeit.

Außerhalb der Anlage haben die Forscher überdies Hinweise auf dicht bewohnte Quartiere entdeckt. Die gesamte Siedlung hatte damals also noch deutlich größere Ausmaße – chinesische Experten sprechen von zwölf Quadratkilometern. Die Schätzungen für die Einwohnerzahl gehen auseinander: Manche Forscher rechnen mit 30000 Menschen, die in Sanxingdui lebten. Rowan Flad setzt die Zahl konservativer an, er geht von rund 10000 Einwohnern aus.

Keine Stadtmauer, sondern eine Flutbarriere?

Die Mauer selbst ist imposant und in ihrer Form bemerkenswert. Sie war 6 Meter hoch und am Fuß 40 Meter breit, entsprach aber in ihrer Form keiner typischen Wehranlage. »Die Innenseite der Mauer steigt sehr steil an«, berichtet Flad. »Und außen ist sie flacher geneigt.« Für eine Verteidigung sei das nicht gerade ideal. An der Außenseite sei die Befestigung zudem sehr weich beschaffen gewesen. Laut Flad wirke es so, als ob die beiden Flüsse, die einst durch Sanxingdui flossen, immer wieder Sedimente herangespült hätten. »Möglicherweise diente die Wehranlage als gigantische Flutmauer – als Barriere gegen die nach dem Monsunregen anschwellenden Flüsse.«

Das würde das spätere Schicksal der Stadt erklären. Vielleicht beschädigten immer wieder Überschwemmungen die Siedlung. Jedenfalls war sie im 11. Jahrhundert v. Chr. relativ schnell verlassen worden, in Richtung Jinsha, wo heute ein Wohnviertel der Millionenstadt Chengdu liegt. Womöglich, so Jay Xu, der Sanxingdui-Experte aus San Francisco, war genau diese ständige existentielle Bedrohung durch die Monsunfluten der Grund, den höheren Mächten zu opfern: mit aufwändigen Ritualen und riesigen Gruben, die die Menschen von Sanxingdui mit ihren wertvollsten Gütern füllten, um die Götter gnädig zu stimmen. ▶

QUELLE

Zhao, W.: New archeological marvels of ancient Shu civilization, National Science Review 8, 2021

REZENSIONEN



Laurence C. Smith
**WELTGESCHICHTE
DER FLÜSSE**

Wie mächtige
Ströme Reiche
schufen, Kulturen
zerstörten und
unsere Zivilisation
prägen

Siedler, München
2022

448 S., € 26,-



NATUR FLÜSSE ALS VEREINIGUNG

»Weltgeschichte der Flüsse«
des Geowissenschaftlers
Laurence C. Smith ist eine
Wucht: naturwissenschaftlich
und kulturhistorisch.

► »Mit den ersten Regenfällen hat sich die Welt für immer verändert«: So beginnt der Geowissenschaftler Laurence C. Smith sein Buch zur Geschichte der Flüsse. Dazu blickt er rund vier Milliarden Jahre zurück, als sich die ersten Rinnenale und Bäche bildeten. Kaum verbanden sie sich zu Strömen, begannen sie ihr ungeheures Werk, das sie bis heute fortsetzen:

Berge abtragen und Tiefland auffüllen, Gesteine auflösen und Sedimente in Meere und Seen verfrachten.

Flüsse formen aber nicht nur die Gestalt der Erde, sie haben Entscheidendes zur Geschichte der Menschheit beigetragen. Dieses Buch zu lesen bedeutet, in jedem Winkel unseres Planeten und des Lebens die Macht der Ströme zu erkennen.



DIE AMAZONAS-
REGION in Vene-
zuela ist durch viele
Flüsse geprägt.

Flüsse sind Handelswege, sie bewässern und düngen, stellen Energie bereit, ernähren Milliarden von Menschen, überschwemmen ganze Landstriche, spielen in Kriegen eine enorme Rolle – und die meisten Großstädte wurden an ihren Ufern gegründet. Flüsse als Grenzen sind praktisch, billig und oft brutal: Denn in ihnen ertrinken Personen, etwa im Rio Grande

zwischen Mexiko und den USA, oder im Limpopo, zwischen Simbabwe und Südafrika, wo Migranten von Flusspferden getötet und von Krokodilen verschlungen werden.

Gleich zu Beginn nimmt Smith die Leserinnen und Leser mit zu den vier großen alten Flusskulturen: an den Nil, ins Zweistromland, an Indus und Ghaggar, an den Jangtse und den

Gelben Fluss. Nomaden hatten die fruchtbaren Täler, die diese Flüsse geschaffen hatten, für sich entdeckt, und lernten, das Wasser für Ackerbau und Viehzucht zu nutzen. Wer nicht weiterzieht, sondern am Strom bleibt, beginnt Dämme und Bewässerungsanlagen zu konstruieren, Schiffe und bald schon Städte zu bauen, Fischfang zu kultivieren und Wasserräder zu

REZENSIONEN

entwickeln. In diesen »Flussgesellschaften« (oder »hydraulischen Gesellschaften«) entstand eine Vielzahl neuer Berufe. Schon früh begannen die Menschen, den Wasserpegel zu messen, und lernten einzuschätzen, ob ein Jahr des Reichtums oder des Hungers vor ihnen lag. Smith beschreibt die »Nilometer« aus Stein, in die Markierungen zum Wasserstand eingekerbt wurden. Sie bieten die am weitesten zurückreichende schriftliche Aufzeichnung wissenschaftlicher Daten der Menschheit.

Dass Flüsse niemandem gehören, bedeutet, dass um die Wasserverteilung ständig gerungen werden muss. Immer steht die existentielle Frage im Raum: Wer gräbt wem das Wasser ab? Allein der Nil durchquert heute elf Nationen, den Jordan teilen sich Israel, Jordanien, der Libanon, die palästinensischen Gebiete und Syrien. Flüsse erfordern selbst die Kooperation verfeindeter Staaten. Aktuell gibt es an die 500 Vereinbarungen zur gemeinsamen Nutzung länderübergreifender Flüsse. Tendenz steigend.

Der Autor kommt zum Schluss, dass Flüsse häufiger zu Vereinigung als zu Trennung beitragen. Dennoch werden sie als Waffen eingesetzt. Besonders grausam tat dies der chinesische Militär Chiang Kai-shek, der 1938 die Sprengung von Deichen am Gelben Fluss befahl, um japanische Invasoren zu stoppen. Die Überschwemmungen löschten das Leben von knapp 900 000 chinesischen Zivilisten aus. Vier Millionen wurden zu Flüchtlingen. Die Kältschnäuzigkeit Kai-sheks trieb viele Chinesen in die Arme der Kommunisten, denn Mao schickte seine Soldaten zu Hilfe und siegte daraufhin im Bürgerkrieg. Ein Beispiel von vielen, wie durch ein Fluss Politik gemacht wurde.

Auch mit Brücken kann man Macht demonstrieren. Etwa, wenn Putin einen Übergang bauen lässt, der Russland mit der annexierten Krim verbindet, um dann eigenhändig den ersten Lkw über das 18 Kilometer lange Bauwerk zu steuern.

Hochinteressant sind ebenfalls die Kapitel über die weltweit geplanten Staudämme und Flussumleitungen,

über Fluch und Segen von Designerflüssen, über die Eingriffe in die Natur. Man liest von GERD, einer Talsperre in Äthiopien, welche die größte Afrikas sein wird, oder von Chinas gigantischem Süd-Nord-Wasserumleitungsprojekt.

Mitreißend berichtet Smith von seiner eigenen Forschung über die blauen Flüsse Grönlands: Schmelzwasser, das über die Eisdecke rauscht und sich hineinfriest. Er lässt die Leserinnen und Leser an seinen Untersuchungen zum Klimawandel mit Hilfe von Hightech-Schwimmkörpern teilhaben, die Fließgeschwindigkeiten messen.

Wem nach der Lektüre des Buchs auf Grund der überwältigenden Faktenfülle der Kopf schwirrt, der sollte sich an einen Fluss setzen. Denn Smith berichtet von Studien, die belegen, dass das Geräusch von fließendem Wasser beruhigt.

Manchmal verliert der Text jedoch seine klare Fließrichtung und beginnt zu mäandern, vor allem in den USA-lastigen Kapiteln. Doch insgesamt ist das Buch eine Wucht, naturwissenschaftlich und kulturhistorisch.

Ilona Jerger, langjährige Chefredakteurin von »natur«, arbeitet als Autorin für Wissenschafts- und Naturthemen in München.

► So viele Menschen wie nie zuvor haben heute – nicht zuletzt dank der sozialen Medien – Zugang zu Diagrammen. Dennoch herrscht wenig Einigkeit, sowohl innerhalb der Statistiken als auch im Umgang mit ihnen. Manche lobpreisen sie als objektive Fakten, andere misstrauen ihnen.

So lautet die These des Datenjournalisten Tin Fischer in seinem neuen Buch »Linke Daten, Rechte Daten«. Anhand von Beispielen, die er etwa den Kategorien Gesundheit, Gewalt und Geld zuordnet, führt er sie fundiert und überzeugend aus. Als studierter Historiker beleuchtet der Autor nämlich nicht nur das Thema Statistik aus verschiedenen Blickwinkeln, sondern erklärt ebenso, wie Menschen früher mit Diagrammen umgegangen sind.

Am Beispiel des Zusammenhangs zwischen Rauchen und Lungenkrebs zeigt er eindrücklich, dass ein gewisses Misstrauen gegenüber Zahlen keine Erfindung von heute ist. Obwohl sich Studien zu den gesundheitsschädlichen Folgen des Zigarettenkonsums in den USA bereits ab den 1950er Jahren häuften, dauerte es viele Jahre, bis dies weithin akzeptiert war. Dann aber bildete sich, wie später in Deutschland, eine wirkungsmächtige Antitabakbewegung in den Staaten heraus, die das Image des Rauchens zumindest bei der Mittel- und Oberschicht nachhaltig veränderte.

Das zeigt, worauf der Autor hinweist: Zahlen sind keine bloßen Fakten; vielmehr hängt ihre Lesart oft von politischen Überzeugungen ab – ob sie privater Natur sind oder geprägt durch den jeweiligen Zeitgeist. Zudem spielt immer die Frage nach Macht eine Rolle: wer Zugang zu Statistiken hat und was man mit ihnen erzählen will.

Fischer warnt deshalb davor, sich allzu sehr auf Diagramme zu verlassen. Zumal diese fehlerhaft oder unvollständig sein können oder anderen Studien möglicherweise widersprechen. Daran erinnert zu werden, ist in Zeiten, in denen die Bedeutung von Zahlen zunimmt und



STATISTIK WIE ZAHLEN FÜR ZÜNDSTOFF SORGEN

Der Autor legt ein kurzweiliges Buch über den nicht immer nüchternen Umgang mit Fakten vor.

es damit nicht selten zu Verwirrung kommt, durchaus sinnvoll.

Das Versprechen des Klappentextes, wie es mit diesem Wissen gelingen kann, besser mit Hilfe von Statistiken zu streiten, hält das Buch bis auf ein paar Anregungen des Autors allerdings nicht ein. Vielleicht lohnt es sich aber, darüber miteinander ins Gespräch zu kommen.

Christina Mikalo hat Kultur- und Nachhaltigkeitsnaturwissenschaften in Lüneburg studiert und ist Journalistin.

SOZIOLOGIE VISIONEN FÜR EINE BESSERE WELT

Am Amazonas, in Marskolonien oder als »direkte Aktionen«: Menschen träumen vom besseren Leben, doch oft scheitern sie. Stefan Selke wünscht sich dennoch mehr Utopielust.

»Imagine«, singt John Lennon, »imagine there's no countries, nothing to kill or die for and no religion, too. Imagine all the people livin' life in peace.« Das Lied sollte nicht nur eine Friedenshymne sein. Zusammen mit Yoko Ono machten sie die Songzeilen zu einem Statement für eine von ihnen gegründete Welt: Nutopia. »It has no land, no boundaries, no passports, only people.« Beide beantragten für ihr Wunschland die Anerkennung bei der UN, fanden aber kein Gehör.

Doch es gibt viele real-utopische Projekte, die Menschen auch tatsächlich ausprobiert haben. Welche das sind und auf welchen Prinzipien sie aufbauen, schildert der Soziologe Stefan Selke in seinem Buch »Wunschland«.

Er beschreibt darin die durchorganisierte Musterstadt Fordländia im Amazonas, die Henry Ford 1928 erschuf, um Latex für seine Autos zu produzieren; das 1968 gegründete Auroville in Indien, wo nach kosmischer Einheit gesucht wird; anarchistische Reformgemeinden; hocheffiziente Smart Cities oder geplante Unterwasserstädte. Es kommen einige

Beispiele zusammen, denn schon seit jeher haben sich Menschen aufgemacht, um eine bessere Welt zu erschaffen. Eines eint alle Utopien: die Hoffnung auf einen Neubeginn, und darauf, »dass es besser wird oder zumindest das Schlimmste« nicht eintrete.

Inzwischen träumen Menschen jedoch selten von besseren Welten. Fortschreitende Selbstzerstörung, deren Überschriften von Jahr zu Jahr schriller klingen, lassen eher an Dystopien glauben: eine Zukunft, in der alles schlechter ist. Ob Kriege, Corona-Pandemie oder Klimawandel, man sieht Endzeitwelten auf sich zukommen, wie sie die Filme von »Mad Max« zeigen, in denen klimatische und zivilisatorische Gewohnheiten zerstört sind.

Warum die bisher gelebten Utopien so oft scheiterten, liege vielleicht daran, dass die Erkundung des Neuen häufig von moralischen, praktischen oder totalitären Fragen »überwuchert« sei. Menschen, die utopische Welten gründen, hätten versagt, und die »Magie der Ankunft« dauere nicht lange an – die utopischen Experimente gerieten zur soziologischen Katastrophe.

Selke seziert die bisherigen gescheiterten Projekte, damit es künftig besser gelingt, eine neue Gesellschaftsordnung umzusetzen. Wichtig sei ein offener Geist, der sich nicht festlegt. Es brauche Menschen mit Utopielust – einen neuartigen Menschentyp: keine kopierten Existenz, sondern mehrdimensionale Persönlichkeiten, deren Motive sich aus dem Kummer der Welt und dem Träumen für eine bessere Zukunft zusammensetzen. Am besten wäre es sogar, wenn Utopien Unterrichtsstoff würden, wünscht sich Selke. Utopien müssten offenbleiben. Damit unterschieden sie sich von totalitären Versionen, die wie in Jonestown schon mal in einem Massenselbstmord enden.

Vielleicht müssten die grundlegenden Innovationen des 21. Jahrhunderts sozialer und nicht technologischer Natur sein. So sieht es zumindest Selke, selbst wenn er die Aufgaben von Technik und Roboter gerade bei

einer möglichen zukünftigen Besiedlung des Weltraums oft erwähnt.

Immer wieder taucht im Buch das All als Sehnsuchtsort für neue Wunschwelten auf. Das könnte daran liegen, dass der Soziologieprofessor einige Semester Luft- und Raumfahrttechnik studiert hat. Die nächste Utopie sieht der Autor aber doch eher auf der Erde. Spätestens wenn Menschen zu den ersten Marskolonien aufbrechen, sollten sie allerdings über eine grundlegend andere Art des Zusammenlebens nachdenken und die neue Welt nicht zu einer verstaubten Kopie irdischer Orte machen, mit Supermärkten, Imbissstuben und Parkhäusern für Geländewagen.

Stefan Selke
WUNSCHLAND

Von irdischen Utopien zu Weltraumkolonien. Eine Reise in die Zukunft unserer Gesellschaft
Ullstein, Berlin 2022
528 S., € 26,99



Viele real-utopische Welten, an denen sich die Menschheit versucht hat, stellt Selke ausführlich vor. In den Texten ist der Autor als Sozialwissenschaftler zu erkennen, was das Buch wissenschaftlich und nie reißerisch macht.

Beim Lesen stößt man auf viele Zitate, wissenswerte Fakten und Quellenangaben. Wohltuend: Man merkt dem Werk die vielfältigen und komplexen Recherchen an, in denen der Autor unterstützt wurde.

Eines hält Selke für sicher: »Solange es träumende Menschen gibt, ist Scheitern nie endgültig. Immer gibt es Hoffnung auf ein besseres Leben. Genau in dem Moment, in dem wir beginnen, über das Wunschland nachzudenken, entsteht es. Ein alternativer Begriff dafür ist: Schöpfung.«

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dülmen.

ASTRONOMIE

DUNKLE MATERIE FÜR DIE WESTENTASCHE

Die Physikerin und »FAZ«-Redakteurin Sibylle Anderl fasst das aktuelle Wissen über Dunkle Materie in einem äußerst lesenswerten Büchlein zusammen.

► Schwarze Löcher, Dunkle Materie und Dunkle Energie – wichtige Bestandteile des Universums sind nicht direkt sichtbar. Während Schwarze Löcher nun als etabliert gelten dürfen, bleiben die beiden anderen Phänomene weiterhin rätselhaft. Wir wissen einfach nicht, woraus diese Komponenten bestehen. Man ist sich aber doch ziemlich sicher, dass sie existieren.

Dunkle Materie wurde bereits in den frühen 1930er Jahren von dem holländischen Astronomen Jan Oort (1900–1992) und dem US-Schweizer Franz Zwicky (1898–1974) vorgeschlagen, um die Bewegungen von Sternen und Galaxien zu erklären. Aber bis heute ist unklar, woraus diese unsichtbare Materieform besteht. Wir können jedoch ihre Gravitationswirkung sehen und wissen, dass sie nicht elektromagnetisch wechselwirkt.

Die als Astrophysikerin ausgebildete Redakteurin der »Frankfurter Allgemeinen Zeitung« Sibylle Anderl widmet der mysteriösen Dunklen Materie ein ganz in Schwarz gehaltenes Büchlein, dessen Format und Gewicht kaum größer sind als eine Tafel Schokolade. Und ebenso wie die leckere Süßigkeit kann man das Sachbuch nur wärmstens empfehlen.

Sibylle Anderl
DUNKLE MATERIE
Das große Rätsel der Kosmologie
C.H.Beck,
München 2022
128 S., €9,95



Es ist in vier Kapiteln gegliedert: Im ersten, das fast die Hälfte des Werks ausmacht, stellt sie die Beobachtungen vor, die uns an die Existenz der Dunklen Materie glauben lassen. An der Länge des Abschnitts sieht man schon, dass es sehr viele verschiedene Hinweise gibt: Die Rotationsgeschwindigkeiten in den Außenbezirken der Galaxien, die Bewegung der Galaxien in Galaxienhaufen, Gravitationslinsen und die Strukturbildung im Universum sind vier zentrale Argumente, warum es Dunkle Materie geben sollte.

Das zweite Kapitel widmet sich der unausweichlichen Frage: Aus was könnte die Dunkle Materie bestehen? Anderl beschreibt acht verschiedene Kandidaten – von denen bislang keiner bestätigt werden konnte, trotz groß angelegter Suche.

Doch es gibt Risse im kosmologischen Standardmodell. Nicht alles passt perfekt zusammen, etwa die Anzahl der Satellitengalaxien oder die Messungen der Hubble-Konstante, die sich signifikant voneinander unterscheiden. Im dritten Kapitel beschreibt Anderl unter anderem MOND, eine modifizierte newtonsche Gravitationstheorie, deren Anhänger vehement gegen die Existenz von Dunkler Materie argumentieren.

Der letzte Punkt leitet so in das sehr lesenswerte vierte Kapitel über, in dem die Autorin die philosophische Seite der geheimnisvollen Substanz diskutiert. Man könnte etwa fragen, ob Dunkle Materie eine zulässige wissenschaftliche Hypothese ist: Kann man nicht immer eine Materieverteilung finden, die jede Art von Bewegungen erklären kann? Ist die Vermutung überhaupt falsifizierbar? Ab wann wären wir bereit, Dunkle Materie als real anzusehen?

Die meisten Astronominnen und Astronomen akzeptieren Dunkle Materie als gültige, im Moment bestmögliche Arbeitshypothese. Auch wenn die Suche nach teilchenphysikalischen Kandidaten im letzten Jahrzehnt enttäuschend verlief, ist das kein Grund aufzugeben. Zu groß sind die Erfolge der Hypothese, und es gibt immer wieder neue Ideen, woraus die Materie bestehen könnte.

Jüngst wurden etwa die erstmals 1966 von Jakow Zeldovich (1914–1987) vorgeschlagenen primordialen Schwarzen Löcher wieder in Betracht gezogen, also Schwarze Löcher, die beim Urknall entstanden sind. Das wäre eine kosmologische Lösung für ein kosmologisches Problem, und die faszinierende Idee, dass die Dunkle Materie auf einen unbekannten Sektor in der Teilchenphysik hinweist, sei schlichtweg unzutreffend.

Der einzige kritikwürdige Punkt an Anderls Buch ist die Auswahl der wenigen schwarz-weißen Abbildungen, die nicht optimal ist. An manchen Stellen wäre der Text besser verständlich, wenn man das Diagramm sehen könnte, das die Autorin in Worten beschreibt. Aber auch so ist es eine angenehm kompakte und ausgesprochen lesenswerte Zusammenstellung eines spannenden und aktuellen Themas der modernen Astrophysik, die man zudem wirklich günstig erwerben kann – selbst wenn in dem Punkt Anderls Buch die Tafel Schokolade übertrifft.

Stefan Gillessen ist promovierter Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik.

BOTANIK

DIE GESCHICHTE DES OBSTANBAUS

Wie Obstgärten die Landschaft verändern, sich als Schutzgebiete anbieten und zur Kreativität anspornen, erklärt der Autor Bernd Brunner in seinem vielseitigen Buch.

► Im früheren Sprachgebrauch verstand man unter »zähmen« die Haltung von Tieren und den Anbau von Pflanzen über Jahrtausende hinweg. Nachdem die Bewohner einer Landschaft sesshaft geworden waren, entstanden unsere heutigen Haustiere und Kulturpflanzen. Auch der Begriff Obstgarten wird kaum noch verwendet. Kommerziell ausgerichtete Kulturen heißen nun Plantagen, alle anderen sind Streuobstwiesen. Der kanadische Originaltitel »Früchte zähmen: Wie Obstgärten die Landschaft veränderten, sich als Schutzgebiete anboten und zur

Bernd Brunner
**VON DER KUNST,
 DIE FRÜCHTE ZU
 ZÄHMEN**
 Eine Kulturge-
 schichte des
 Obstgartens
 Knesebeck,
 München 2022
 288 S., € 22,-



Kreativität anspornten« trifft den Inhalt des außerordentlich vielseitigen Buchs besser als der deutschsprachige Titel. Das weiß man aber erst nach der Lektüre.

Und die lohnt sich allemal. In 18 Kapiteln präsentiert der Autor Bernd Brunner das breit gefächerte Material zum Thema. Einzig zum Lebensraum Streuobstwiese (heute als artenreichstes biologisches Ökosystem zumindest bei uns in Mitteleuropa anerkannt)

findet man keinen eigenen Passus, sondern nur eine kurze begleitende Erwähnung an einer anderen Stelle. Wahrscheinlich, weil es dazu bereits umfangreiche Literatur gibt. Die Schwerpunkte der einzelnen Aufsätze liegen entweder beim Nutzen der Früchte für unseren Hunger oder auf der ästhetischen Seite: beim Genuss mit allen Sinnen – und das mit Beispielen aus jedem Kontinent der Erde.

Unsere Vorfahren haben schon vor 300000 Jahren Früchte gesammelt, also mindestens 100000 Jahre ehe der *Homo sapiens* Afrika verließ. Man fand die Überreste zusammen mit passenden Werkzeugen im nördlichen Jordantal. Während der Sesshaftwerdung begann mit der Errichtung von Hecken als Begrenzung von Nutzflächen und das Pflanzen bestimmter Bäume die Vorstufe der Anlage von Obstgärten. Dabei gab es erstmals bewusst eine Zähmung: Man säte oder pflanzte nur solche Sorten aus, die gewünschte

Eigenschaften (Größe, Geschmack, Duft, Fettgehalt, Wirkstoffe, ...) versprochen. Dazu gehörten Oliven, Datteln, Feigen und Granatapfel. Für Olivenbäume lässt sich das bis in die Übergangszeit von der Alt- zur Jungsteinzeit (15 000 bis 10 000 v. Chr.) nachweisen.

Für Mitteleuropa spielte der Apfel die größte Rolle. Er ist ein Kreuzungsprodukt von Wildäpfeln aus dem zentralasiatischen Raum, und moderne genetische Methoden ordnen alle kultivierten Äpfel heute zu *Malus pumila*. Die so genannte Veredelung durch Anbringen von »Edelreisern« auf eine »Unterlage«, hat man inzwischen zu höchster Vervollkommenung gebracht. Die Sortenvielfalt rief einen neuen Zweig angewandter Botanik ins Leben, die Pomologie. Oft waren es Pfarrer, Apotheker oder Lehrer, die Ordnung in die unübersehbare Vielfalt zu bringen versuchten. Dabei kamen auch seltsame Dinge zu Tage. Der Priester J. C. Jacob Oberdieck (1794–1880) schaffte es, auf einem

Spektrum.tv

Dokumentationen und Reportagen zu den Topthemen der Wissenschaft

Für nur 4,99 € pro Monat
ohne Verpflichtung – ohne Werbung

tv.Spektrum.de/DE/

einigen Apfelbaum 300 Sorten zu veredeln. Der Geistliche Korbinian Aigner (1885–1966) prägte ebenfalls das Gebiet: Als er 1941 im Konzentrationslager Dachau gefangen war, musste er in der Versuchsanstalt für Gewürzpflanzenanbau arbeiten. Ihm gelang die Zucht von vier Apfelsorten (KZ-1 bis KZ-4), wobei sich die Sorte KZ-3 als Treffer erwies. Er konnte die Sämlinge hinausschmuggeln und flüchtete in ein Kloster, wo er sich versteckte. KZ-3 wurde ein erfolgreicher Wirtschafts- und Tafelapfel und ist heute als Korbiniansapfel bekannt.

Die schöne Bebildung im Buch zeugt davon, wie stark Obstgärten oft namhafte Künstler wie Paul Cézanne, Auguste Renoir, Camille Pissarro oder Vincent van Gogh angeregt haben. Renoir hatten es vor allem Gartenszenen angetan, und er ließ sich sogar ein kleines Gartenhaus in einem Olivenhain bauen. Die Ägypter schufen Wandmalereien, die Römer insbesondere Mosaiken.

Bedauernswert und teilweise katastrophal sei der heutige Sortenverlust bei allen wichtigen Obstsorten. In den USA sind von 17000 Apfelsorten nur 4000 erhalten, wobei 15 davon 90 Prozent der Ernte erbringen, allen voran Golden Delicious. Erfreulich sei hingegen die Neubelebung des Quittenanbaus bei uns. Auch an anderer Stelle gibt es Hoffnung: An der Elfenbeinküste und am Indischen Ozean hat man festgestellt, dass Palmenflughunde bei der Wiederbesiedlung gerodeter Flächen helfen: Sie fressen die verschiedensten Früchte, die bis zu neun Stunden im Verdauungstrakt bleiben, während die Tiere große Strecken zurücklegen. Bereits mit Dünger versehen haben sie dann eine gute Startchance. So können sogar neue Ökosysteme entstehen.

Eine Wiederentdeckung von Gärten, die Erhaltung von Obstwiesen und des Straßengrüns wäre wünschenswert. Die Zunahme von Vorgärten aus Steinen oder bloßem Rasen mit Palmen und Bananen macht da kaum Hoffnung. Das Buch könnte helfen, ein Bewusstsein dafür zu schaffen.

Jürgen Alberti ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.

Ian Stewart
WETTER, VIREN UND WAHRSCHEINLICHKEIT
Wie wir die Ungewissheiten des Lebens berechenbar machen
Rowohlt, Hamburg 2022
416 S., €22,-



MATHEMATIK MIT ZAHLEN GEGEN DEN ZUFALL

Ian Stewart lässt Ungewissheiten mit Hilfe der Mathematik gar nicht mehr so ganz ungewiss erscheinen.

► Die Evolution des menschlichen Gehirns ist unter anderem von der Notwendigkeit geprägt worden, Fakt von Fiktion, Wahrheit von Lüge zu unterscheiden. Wir beurteilen neue Informationen im Kontext dessen, was wir bereits gelernt haben. Stoßen wir also auf etwas Unbekanntes, akzeptieren wir es in der Regel nicht sofort. »Wir wären verrückt, wenn wir das täten«, schreibt Ian Stewart in »Wetter, Viren und Wahrscheinlichkeit«.

Kein Wunder, dass der Autor so denkt. Er ist einer der bekanntesten britischen Professoren für Mathematik und damit sicher ein extrem rational denkender Zeitgenosse. Das wird schnell deutlich, wenn man sein neues Buch zur Hand nimmt. Vor Zahlenreihen, Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnungen sollte man nicht zurückschrecken: Sie sind elementarer Bestandteil der Lektüre. Wer sich im Reich der Zahlen wohlfühlt, ist nicht schlecht aufgehoben, wenn der Autor erklärt, wie Ungewissheiten mathematisch betrachtet gar nicht mehr so ungewiss erscheinen – und warum berechnete Vorhersagen durchaus eine hohe Chance haben, einzutreffen.

Als eines der ersten Beispiele führt Stewart das Auftreten von Seuchen und Pandemien an. Kein Wunder, entstand das Buch teilweise zu den Hochzeiten der Corona-Pandemie.

Noch vor wenigen Jahrhunderten galten solche Katastrophen als zufällige Naturereignisse. Doch Fortschritte auf verschiedenen Gebieten – und Mathematik spielt dabei eine wichtige Rolle – hat uns Werkzeuge an die Hand gegeben, viele der schlimmsten Auswirkungen abzumildern, ist Stewart überzeugt. Wie das abstrakte Fach der Medizin dient, erläutert er in einem eigenen Kapitel. Die aktuelle Covid-Pandemie thematisiert er darin aber nicht, stattdessen geht es unter anderem um Wahrscheinlichkeiten abgeschlossener Studien zum Thema Brustkrebs oder der Einnahme von Antidepressiva.

Neben der Medizin kommen im Buch viele weitere Themen zur Sprache, bei denen die Mathematik Unwägbarkeiten abfedern kann. Etwa in der Meteorologie, die sicher zu den schwierigsten Disziplinen gehört, wenn es darum geht, verlässliche Prognosen abzugeben. Dabei taucht die berühmte Frage auf, ob der Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien wirklich einen Sturm in Texas auslösen kann.

Spannend wird es ebenfalls gegen Ende, wenn es um die Mutter aller Zufallsereignisse geht, die Quantenunwissheit. Die Quantenphysik lehrt uns, dass im Kosmos alles zufällig passiert. Vorhersagen werden schon im Ansatz vaporisiert. Auch Stewart bezweifelt, dass sich das jemals ausräumen lassen wird, glaubt aber dennoch, dass es eine deterministische Erklärung dafür geben könnte.

Meist verwehre die Ungewissheit den Blick in die Zukunft. Doch sie kann auch von Nutzen sein, schreibt Stewart. So kann man etwa in Monte-Carlo-Simulationen Ergebnisse aus vielen simulierten Ungewissheiten ableiten.

Nach der Lektüre bleibt zumindest eine Gewissheit: Trotz aller Mathematik, Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnungen wird unser Leben weiterhin von Zufällen und Unwägbarkeiten geprägt bleiben. Nicht zuletzt machen sie unser Dasein spannend und somit ein bisschen lebenswert. Die Zukunft ist ungewiss, das erkennt Stewart am Ende des Buchs an.

Thorsten Naeser ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.

LESERBRIEFE

HIRSCH STATT REHBOCK

In europäischen Wäldern werden Kadaver meist schnell entsorgt. Dabei bietet Aas eine wichtige Nahrungsquelle für Insekten, Vögel oder Säugetiere, wie Artenschutzspezialist René Krawczynski erläuterte. (»Leben im Tod«, »Spektrum« Mai 2022, S. 30)

Hans von Besser, Würzburg: In dem sehr interessanten Artikel wird vielfältig anschaulich gezeigt, dass Fauna, Flora und Destruenten in Mitteleuropa ein perfekt angepasstes Räderwerk des Stoffkreislaufs bilden. Anthropogene Einflüsse zur Erweiterung der Biodiversität sind zurückzufahren. Bravo!

Bei dem auf S. 30/31 abgebildeten Kadaver handelt es sich jedoch nicht wie in der Bildbeschreibung angegeben um einen Rehbock, sondern vielmehr um einen viel größeren Hirsch, sehr wahrscheinlich einen Rothirsch (*Cervus elaphus*). Das kann man an der Stellung der Sprosse des Geweih, der gesamten Schädelgröße, den Verhältnissen von Schädellänge zu Geweihlänge sowie am Größenvergleich zum Rotfuchs festmachen.

Interessant ist auch, dass der Hirsch sich mit seinem Geweih in Plastikschnüren verheddert hat. Man kann spekulieren, ob ihm diese anthropogene Umweltverschmutzung sogar zum Verhängnis wurde.

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.

ERRATA

»Zeit für eine neue Ordnung?«, »Spektrum« Mai 2022, S. 56

Auf der ersten Doppelseite des Artikels sind Fehler im Periodensystem: Das Elementsymbol für Aluminium lautet nicht Ai, sondern Al, dasjenige für Thallium Tl statt Ti. Außerdem findet sich beim Element Rubidium (Rb) fälschlicherweise die Bezeichnung »Cesium«. Wir bedanken uns bei unseren Leserinnen und Lesern für die Hinweise.

»Der Computer als OP-Assistent«,

»Spektrum« Mai 2022, S. 48

Die Strecke in der Abbildung auf S. 50 unten ist gedruckt rund 3 Zentimeter lang. Das passt nicht zur Angabe im Fließtext – eigentlich sollte sie 6,5 Zentimeter messen.

Spektrum der Wissenschaft

Chefredaktion: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Manon Bischoff, Dr. Andreas Jahn, Dr. Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang, Mike Zeitz (stellv. Redaktionsleiter); E-Mail: redaktion@spektrum.de

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 104838, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Assistenz Geschäftsleitung: Stefanie Lacher

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: Franziska Konitzer

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, 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 € 9,30 (D/A/L), CHF 14,–; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 98,40; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 75,–; 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.

Einem Teil der Auflage liegt Werbung der Firma RDS Reise Service Deutschland 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. 43 vom 1.1.2022.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2022 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Laura Helmuth
Executive Vice President: Michael Florek
President: Kimberly Lau



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



Blinde Injektionen

Warum wir außerirdische Botschaften simulieren.

Eine Kurzgeschichte von Brian Clegg

Leonarda Loos, vormals Chefwissenschaftlerin von Farside, dem mondfesten SETI-Projekt zur Suche nach außerirdischer Intelligenz, strich ihre Jacke glatt. »Die neue Direktorin hat den Job wegen ihrer politischen Beziehungen bekommen«, meinte sie abschätzig. »Die Frau hat von nichts eine Ahnung.«

»Wenn Sie sich da nicht irren ...« Simon Traynor, von Loos als Doktorand betreut, machte ein besorgtes Gesicht. Aber er schaute ohnehin immer bitterernst drein – eben ein typischer Doktorand. »Die Direktorin soll ein großes Tier bei einem Fernsehsender gewesen sein, spezialisiert auf Reality Shows. Sie wird vielleicht nicht wissen, was eine blinde Injektion ist, aber von Vorspiegelung falscher Tatsachen versteht sie sicher was.«

Auf dem Bildschirm meldete sich ein mit künstlicher Intelligenz ausgestatteter Avatar, der als Sekretär fungierte, und zwinkerte ihnen schelmisch zu. Loos nahm sich vor, noch heute bei der KI-Serviceabteilung eine Beschwerde einzureichen: Der Sekretär solle das Blinzeln gefälligst sein lassen. »Sie können nun eintreten«, flötete der Avatar, »die Direktorin erwartet Sie.«

»Leonarda! Simon! Wie nett von Ihnen, sich die Zeit zu nehmen! Aber bitte, setzen Sie sich doch!« Die frischgebackene Farside-Direktorin Liz Calvert wies auf die Stühle für Besucher. »Also gut, Sie wollen mir etwas über blinde Injektionen erzählen. Ich muss gestehen, das macht mir ein bisschen Angst – ich kann Nadeln nicht ausstehen!« Sie lachte ausgiebig über ihren eigenen Witz.

»Es geht überhaupt nicht um Na...« Traynor verstummte abrupt, weil seine Doktormutter ihn mit dem Ellbogen in die Rippen stieß.

»Eigentlich ist es ganz simpel«, erklärte Loos. »Die Signale, nach denen wir Ausschau halten, sind so schwach, dass sie sich kaum nachweisen lassen. Wir suchen nach winzigen Abweichungen in einem fortwährend variierten Hintergrund. Wissenschaftler sind nicht vollkommen; sie machen Fehler. Nur zu leicht nimmt das Wunschdenken überhand, vor allem bei einem derart emotional aufgeladenen Thema wie der Suche nach außerirdischem Leben. Deshalb werden die Daten vorsichtshalber blind verarbeitet, ohne sofort gedeutet zu werden, und dem Team an den Detektoren ist bewusst, dass wir mitunter ein gefälschtes Signal – eine so genannte blinde Injektion – einschmuggeln, um die Präzision des Detektorsystems zu überprüfen. Blinde Injektionen wurden schon früher sehr effektiv beim Nachweis von Gravitationswellen eingesetzt.«

»Können Sie mir demonstrieren, wie so etwas gemacht wird?«, fragte Calvert und deutete vage auf ihren Computer.

»Das lässt sich nur von unserem Büro aus durchführen«, versetzte Loos. »So ist es Vorschrift. Wir arbeiten völlig separat vom eigentlichen Detektor-Team. Auf diese Weise können wir deren Interpretation der Daten nicht beeinflussen. Wir dürfen nicht einmal in der Kantine am selben Tisch sitzen.«

»Das ist doch lächerlich, finden Sie nicht auch?«, mutmaßte Calvert.

»Oh nein, das muss sein«, widersprach Traynor vorlaut. »Ohne Zweifel haben Sie Kenntnis von den Versuchen mit schlauen Ratten.«

»Schlaue Ratten?« Calvert war schon wieder zu Scherzen aufgelegt. »Hat das etwas mit parlamentarischen Expertenanhörungen zu tun?«

»Nein«, warf Loos schnell ein, ehe Traynor antworten konnte. »Das bezieht sich auf ein Experiment aus den 1960er Jahren. Man erzählte Forschern, die testen wollten, wie gut sich Ratten in Labyrinthen zurechtfanden, dass eine bestimmte Gruppe von Versuchstieren besonders klug sei. Daraufhin schnitten diese Ratten doppelt so gut ab wie die übrigen. In Wirklichkeit waren alle gleich flink. Allein das vermeintliche Wissen, bestimmte Tiere seien klüger, beeinflusste das Resultat. Wir müssen unbedingt vermeiden, dass das mondfesten SETI-Team erfährt, ob es eine blinde Injektion gegeben hat oder nicht.«

»Also gut, dann gehen wir jetzt in Ihr Büro«, sagte Calvert. Sie hielt ihnen die Tür auf und eilte durch den Korridor voran. »Bei der Gelegenheit, wie kam das«, rief sie über die Schulter, »warum sind Sie nicht mehr leitende Wissenschaftlerin?«

Loos lief rot an. »Mir ist es stets vor allem um die Qualität der Daten gegangen«, antwortete sie. »Meine neue Stellung garantiert, dass das gewährleistet ist.«

»Aber es war eine Degradierung«, stellte Calvert fest.

»Technisch betrachtet, ja.«

»Und zugleich wurde der damalige Direktor entlassen?«

»Äh ... ich zeigte Direktor Grossman wegen ungebührlichen Benehmens an.«

»Whistleblower werden selten auf Rosen gebettet«, meinte Calvert. »Meine Liebe, Sie können froh sein, dass man Sie nicht gefeuert hat. Immerhin, das SETI-Observatorium wird bald vom Walter-T.-Grossman-Array zum Bell-Burnell-Array umbenannt werden, also war Ihr Opfer nicht ganz umsonst. Ist Ihr Büro direkt mit der dunklen Seite des Monds verbunden?«

»Der Mond hat keine dunkle Seite«, wandte Traynor ein.

»Nein, eine direkte Verbindung gibt es nicht«, antwortete Loos, ohne auf ihren Assistenten einzugehen. »Die Daten

werden von den Detektoren auf der erdabgewandten Seite des Monds gesammelt, aber erst hier bei uns ausgewertet. Dabei speisen wir die blinde Injektion in das Verarbeitungssystem; sie erweckt nur den Anschein, vom Mond zu stammen.« Loos schloss ihr Büro auf und bat die Direktorin herein. Dann nickte sie Traynor zu.

»Es ist ein simples Verfahren«, betonte dieser. Er berührte ein Symbol auf dem Bildschirm. »Ich gebe hier bloß ein Datum und eine Zeit ein sowie ein paar einfache Parameter, und dann drücke ich auf Enter.«

Es entstand eine Pause. »Also los«, forderte Calvert.

»Entschuldigen Sie, Frau Direktor, das dürfen wir nicht«, erwiderte Loos. »Sobald Sie wissen, was wir da getan haben, ist die Injektion nicht mehr blind.«

»Wollen Sie mir unterstellen, ich könnte kein Geheimnis bewahren?«, fragte Calvert.

»Aber nein, natürlich nicht!«, rief Loos. Sie hoffte, dass ihre Stimme laut genug war, um Traynors unvermeidliches »Jawohl!« zu übertönen.

»Dann machen Sie doch!«

Loos zuckte die Achseln und schob Traynor beiseite. Sie tippte eine Reihe von Parametern ein und berührte die Enter-Taste.

»Besten Dank«, sagte Calvert. Sie lächelte kurz. »Das war doch nicht allzu schwer, oder?« Ohne eine Antwort abzuwarten, rauschte sie aus dem Zimmer.

Traynor blickte unsicher vom Bildschirm zu seiner Chefin. »Ihnen ist doch klar, dass Sie nur die Parameter eingetippt haben? Die Injektion wurde nicht aktiviert.«

»Allerdings«, antwortete Loos. »Und jetzt löschen wir den ganzen Vorgang spurlos.« Im selben Augenblick platzte Calvert noch einmal herein, und Loos schaltete schnell das Programm ab.

»Hab meine Brille vergessen«, erklärte Calvert.

*

»Was sagen Sie zu den Gerüchten auf Twitter?«, fragte Traynor. »Irgendjemand hat die Resultate von gestern durchsickern lassen. Es heißt, darin sei ein klares außerirdisches Signal aufgetreten!«

»Die Leute sind gerade dabei, das Protokoll der blinden Injektionen mit den Daten abzugleichen«, erwiderte Loos. »In 30 Sekunden werden sie herausfinden, dass es diesmal keine Injektion gegeben hat, und dann bricht wirklich der große Jubel aus.«

Traditionellerweise wurde das Injektionsteam nicht zu öffentlichen Verlautbarungen eingeladen, aber aus dem

Sekunden später war ein vielstimmiges Stöhnen zu hören, mit dem sich tiefe Enttäuschung Bahn brach

Presseraum schallten die Stimmen der versammelten Medienvertreter herüber, die im Chor den Countdown riefen. Sekunden später war ein vielstimmiges Stöhnen zu hören, mit dem sich tiefe Enttäuschung Bahn brach.

»So ein Mist«, sagte Loos plötzlich. »Ich habe vergessen, die Aufzeichnung der Injektion, die es niemals gab, zu löschen. Und dadurch haben sie ein echtes Signal als Fake charakterisiert.«

»Was? Das müssen wir den Leuten sofort sagen«, verlangte Traynor.

»Nein, wir warten. Mit ein bisschen Glück wird das Signal in ein paar Monaten erneut auftauchen, und dann wird diese sensationelle Entdeckung mit dem Bell-Burnell-Array statt dem Grossman-Array verknüpft sein. Manchmal bedeutet wissenschaftliche Arbeit, dass man den Wert der Stille zu schätzen lernt. Wir schweigen.«

»War das etwa eine Anspielung auf den Kultfilm ›Lautlos im Weltraum?‹«

»Also echt, Simon. Halt einfach die Klappe.« ▶

DER AUTOR

Brian Clegg ist ein englischer Wissenschaftsautor. Er hat zahlreiche Bücher veröffentlicht, zuletzt »Was die Welt zusammenhält: Muster in der Natur – vom Schneckenhaus bis zur Doppelhelix«.

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature, published online, 8. April 2022

VORSCHAU

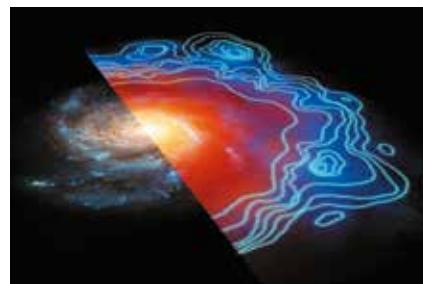


METAMORPHOSIS / GETTY IMAGES / STOCK



VORBEUGENDE KORREKTUR

Was Quantencomputer so stark macht, ist gleichzeitig ihre größte Schwäche: Durch ihre quantenmechanischen Eigenschaften sind Qubits extrem fehleranfällig. Neue Techniken zielen darauf ab, solche Fehler zu beheben, bevor sie entstehen können.



KENN BROWN, MONDROTIC STUDIOS

DER MECHANISMUS VON ANTIKYTHERA

Im Jahr 1900 entdeckten Taucher am Meeresgrund vor der griechischen Insel Antikythera einen Metallklumpen mit etlichen Präzisionszahnrädern aus dem 2. oder 1. Jahrhundert v. Chr. Fachleute hatten diese Technologie bis dahin für Jahrhunderte jünger gehalten. Nun haben sie dem astronomischen Recheninstrument, das die Bewegungen der Gestirne abbildete, neue Geheimnisse entlockt.



ALAMY / REUTERS / TORU HANAI

ALTERnde GESELLSCHAFTEN

In zahlreichen Staaten rund um den Globus ändert sich die Bevölkerungsstruktur gravierend. Welch weit reichende gesellschaftliche Konsequenzen das hat, zeigt sich exemplarisch an Japan und Indien – zwei Ländern, in denen sich jeweils ein extremer demografischer Wandel vollzieht.

KOSMISCHE SPURENSUCHE

Teilchenbeschleuniger und andere irdische Experimente haben noch keinen Hinweis darauf geliefert, was hinter der Dunklen Materie steckt. Verrät der Blick auf Phänomene im Weltraum etwas über die Natur des unsichtbaren Stoffs?

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

Jetzt **Spektrum** der Wissenschaft abonnieren
und keine Ausgabe mehr verpassen!



Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination:
12 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder
als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem
von den exklusiven Vorteilen und Angeboten
von **Spektrum** PLUS – wie kostenlosen Downloads,
Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.



Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: service@spektrum.de

Spektrum.de/aktion/sdwabo

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.

Spektrum
die Wissenschaft
DIE WOCHE

NR 19
12.05.2022

> 50:50-Chance für 1,5-Grad-Marke bis 2026
> Medien können Lebensmüden neue Hoffnung geben
> Warum manche Säugetiere im UV-Licht leuchten

TITELTHEMA: HECKEN

Wie lebende Zäune Klima und Umwelt schützen

Im 19. und 20. Jahrhundert verschwanden Hecken aus der Landschaft. Nun hätte man sie gern zurück, denn sie nützen gleich auf mehrere Arten. Doch das gestaltet sich schwierig.

HEPATITIS BEI KINDERN
»Leberschäden durch Adenoviren sind selten, aber sie passieren«

QUANTENGRAVITATION
Woraus besteht die Raumzeit?

PALÄONTOLOGIE
Wie ein brasilianischer Dino für eine postkoloniale Bewegung sorgte

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 monatlich kündbaren Abonnement € 0,92 je Ausgabe; ermäßigt sogar nur € 0,69.
Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

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

