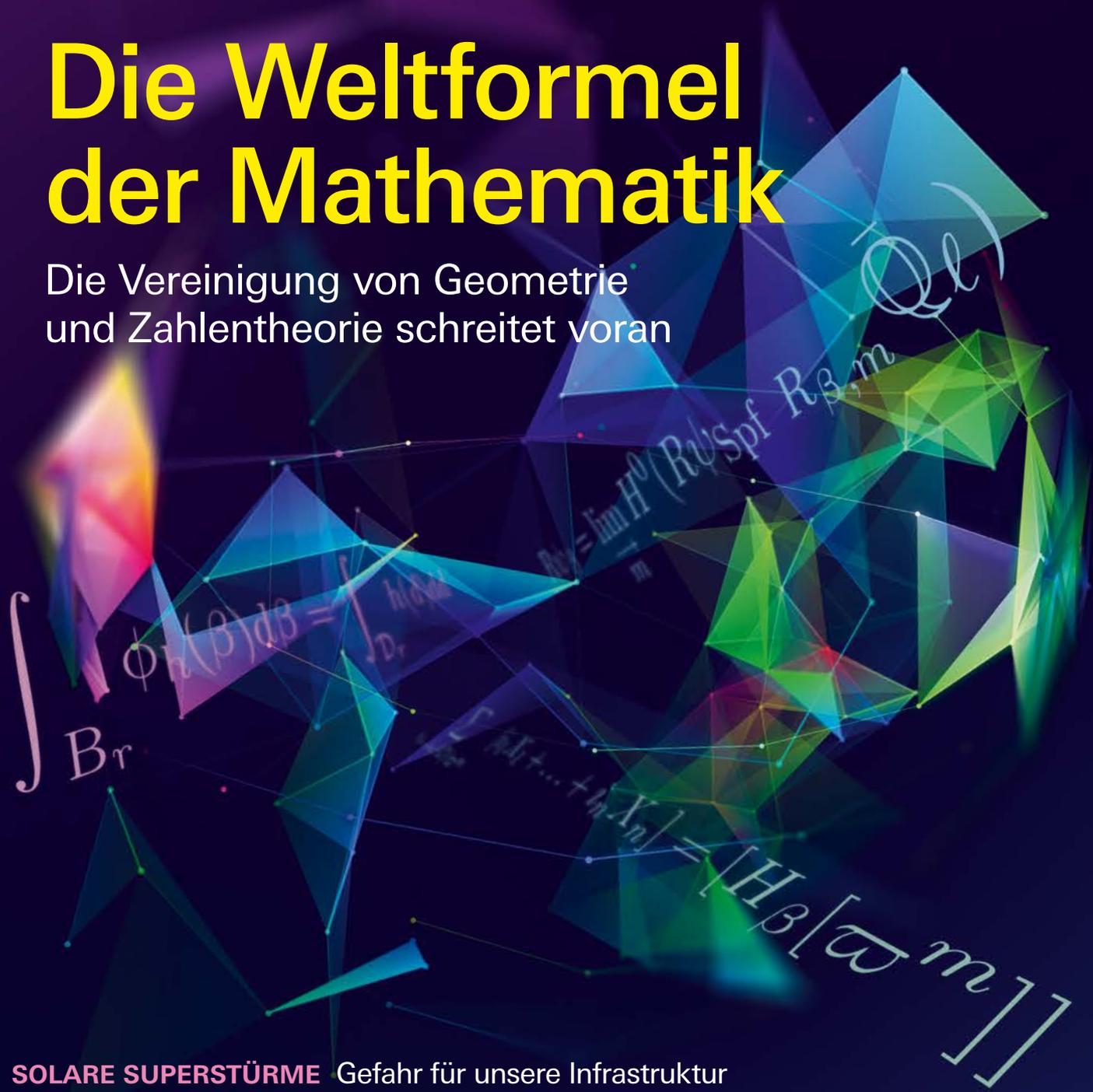


# Spektrum

der Wissenschaft

## Die Weltformel der Mathematik

Die Vereinigung von Geometrie und Zahlentheorie schreitet voran



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



**SOLARE SUPERSTÜRME** Gefahr für unsere Infrastruktur  
**AUTOIMMUNKRANKHEITEN** Neue Mittel gegen die Selbstzerstörung  
**KÜNSTLICHE INTELLIGENZ** Verstehen Maschinen Gefühle?

# Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**



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

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



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



Hier bestellen:

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

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



# EDITORIAL UNSERE FRAGILE EXISTENZ

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.de

► Im Grunde leben wir hier ein privilegiertes Leben: Moderne Medizin, unser Sozialstaat sowie Versicherungen aller Art müssten uns eigentlich das Gefühl vermitteln, eine recht gesicherte Existenz zu führen. Wie fragil diese dann doch plötzlich erscheinen kann, hat uns nicht zuletzt die Covid-19-Pandemie vor Augen geführt.

Tatsächlich sind wir umgeben von potenziellen Bedrohungen, die wir normalerweise nicht wahrnehmen oder lieber ausblenden. Niemand weiß, ob die nächste Pandemie bereits irgendwo in der Welt anläuft, ohne dass wir etwas davon ahnen. Und die Auswirkungen der aktuellen Klimaveränderungen sind zwar inzwischen in Politik und Medien omnipräsent, aber auch hier gibt es noch bisher vernachlässigte Gefahren aufzudecken. So sorgt der zunehmende Gehalt an Wasserdampf in der Atmosphäre vermehrt für Wirbelstürme und Überschwemmungen, wie Jennifer Francis vom Woodwell Climate Research Center in Massachusetts, USA, ab S. 54 erläutert.

Andere Bedrohungen entspringen weit außerhalb unseres Planeten. Damit meine ich weniger die in manchen Kinofilmen heraufbeschworene Gefahr eines apokalyptischen Asteroideneinschlags, sondern etwa solare Superstürme mit möglicherweise fatalen Auswirkungen auf unsere technische Infrastruktur, von Satelliten bis hin zu Unterseekabeln (S. 68).

Und wem natürliche Pandemien noch nicht bedrohlich genug vorkommen, der kann sich zusätzlich vor gentechnisch aufgerüsteten Krankheitserregern fürchten. Im Interview ab S. 48 diskutiert die Virologin Silke Stertz von der Universität Zürich Nutzen und Gefahren so genannter Gain-of-Function-Experimente, bei denen Viren zu Forschungszwecken mit neuen Fähigkeiten ausgestattet werden. Ein Thema, das im Rahmen der Diskussion um den Ursprung der Covid-19-Pandemie zusätzliche Brisanz erhalten hat – findet doch in letzter Zeit die Hypothese vom Laborunfall wieder vermehrt Unterstützung.

Nachdenklich grüßt Ihr



## NEU AM KIOSK!

**Spektrum SPEZIAL** Physik – Mathematik – Technik 1.22 präsentiert eine Auswahl von Beiträgen aus unserer beliebten Rubrik »Schlichting!«, die verschiedenste physikalische Alltagsphänomene erklärt.

IN DIESER AUSGABE



PHILIPP AMMON FÜR  
QUANTA MAGAZINE

## ANA CARAIANI

Die in Rumänien aufgewachsene Mathematikerin hatte es nicht immer leicht, sich in dem von Männern dominierten Fach durchzusetzen, wie sie ab S. 19 erzählt.



## JEAN-LUC VOISIN

*Homo naledi*, der letzte Neuzugang im menschlichen Stammbaum, war wohl ein gewiefter Kletterer. Das zeige der Knochenbau, schreibt der Paläoanthropologe ab S. 32.



UZI / FRANK BRÜDERLI

## SILKE STERTZ

Ständig bringt die Natur neue Krankheitserreger hervor. Wir können uns damit abfinden – oder wir können versuchen, es im Labor vorwegzunehmen, um uns darauf vorzubereiten. Letzteres sei besser, sagt die Virologin (S. 48).

# INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

22 FORSCHUNG AKTUELL

## **Kinderstube unterm Eis**

Weltweit größtes Fischbrutgebiet in der Antarktis entdeckt.

## **KI statt Bauchgefühl**

Computer stoßen auf mathematische Verbindungen.

## **Von Schwämmen lernen**

Was die einfachen Tiere über den Ursprung des Nervensystems verraten.

31 SPRINGERS EINWÜRFE

## **Mächtige Männchen, willige Weibchen?**

Die Thesen zur sexuellen Selektion loten Grenzen aus.

53 FREISTETTERS FORMELWELT

## **Denkfehler beim Münzwurf**

Statistik-Irrtümer im Kasino

74 SCHLICHTING!

## **Kratzer um die Sonne**

Sonst unsichtbare Rillen glänzen im Licht kreisrund.

84 REZENSIONEN

91 IMPRESSUM

93 LESERBRIEFE

95 ZEITREISE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

98 VORSCHAU

12 LANGLANDS-PROGRAMM

## **DIE VEREINHEITLICHUNG DER MATHEMATIK**

Die vor 55 Jahren gegründete Initiative soll grundverschiedene Bereiche der Mathematik zusammenführen.

Von Kevin Hartnett

19 INTERVIEW **DIE BRÜCKENBAUERIN**

Die Mathematikerin Ana Caraiani erklärt, wie sie im Zuge des Langlands-Programms ungeahnte Zusammenhänge offenlegt.

Von Steve Nadis

32 *HOMO NALEDI* **DER FELSKLETTERER**

Der Frühmensch war aufs Klettern spezialisiert, obgleich in seiner Umwelt der Baumbewuchs spärlich war. Offenbar hatte sich der Hominine einen besonderen Lebensraum erschlossen.

Von Jean-Luc Voisin

40 MEDIZIN **WIDER DIE SELBSTZERSTÖRUNG**

**Serie: Der Feind im eigenen Körper (Teil 3)** Immununterdrückende Arzneistoffe lindern Autoimmunprobleme, haben aber unerwünschte Nebenwirkungen. Forscher arbeiten deshalb an gezielteren Therapien.

Von Marla Broadfoot

48 INTERVIEW **»KRITIKER ÜBERSCHÄTZEN DAS RISIKO«**

Gain-of-Function-Experimente sind stark umstritten. Laut der Virologin Silke Stertz brauchen wir diese Forschung trotzdem.

Von Frank Schubert

54 WASSERDAMPF **DAS ÜBERSEHENE TREIBHAUSGAS**

Eine wärmere Atmosphäre speichert mehr Wasserdampf. Der liefert reichlich Energie für Wirbelstürme und weitere Unwetter.

Von Jennifer Francis

62 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN  
**FRUCHTIGER EXPERIMENTIERKASTEN**

Orangen sind nicht nur Vitaminbomben, sie haben auch großes Forschungs- und Unterhaltungspotenzial.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

68 SONNENAKTIVITÄT **GEFAHR DURCH SOLARE SUPERSTÜRME**

Teilchenschauer können irdische Technik beschädigen. Solche Ereignisse fallen laut neuesten Analysen mitunter stärker aus als gedacht.

Von Jonathan O'Callaghan

76 KÜNSTLICHE INTELLIGENZ **BERECHNETE GEFÜHLE**

Unternehmen setzen zunehmend KI ein, um Emotionen und Persönlichkeit zu analysieren. Aber die neuen Methoden spiegeln oft Vorurteile wider.

Von John McQuaid

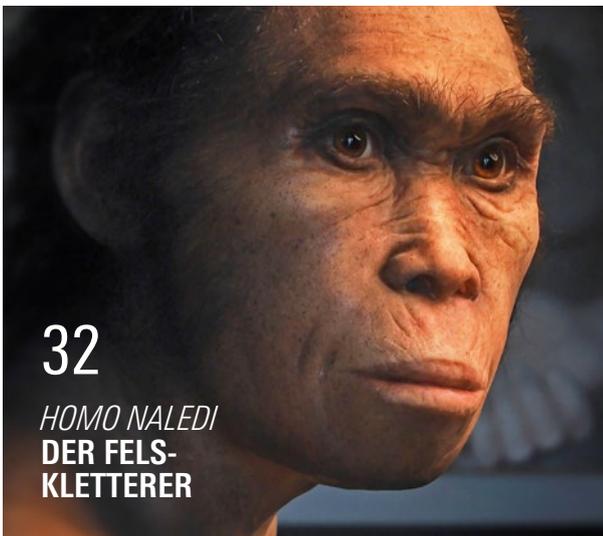
TITELBILD:  
IN-FUTURE / GETTY IMAGES / ISTOCK;  
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



12

TITELTHEMA  
DIE VEREINHEITLICHUNG DER MATHEMATIK

MATTEO BASSINI / FÜR QUANTA MAGAZINE. BEARBEITUNG: OLEVA SHVAKHO / QUANTA MAGAZINE



32

HOMO NALEDI  
DER FELS-  
KLETTERER

S. ENTRESSANGELE / E. DAVIES / SCIENCE PHOTO LIBRARY



40

MEDIZIN  
DAS IMMUNSYSTEM  
INS LOT BRINGEN

MELETIOS VERRAS / GETTY IMAGES / ISTOCK. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



54

WASSERDAMPF  
DAS ÜBERSEHENE  
TREIBHAUSGAS

PELES/PHOTOGRAPHY / GETTY IMAGES / ISTOCK



68

SONNENAKTIVITÄT  
GEFAHR DURCH SOLARE  
SUPERSTÜRME

NASA/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. (SUN: SSPC, NASA, GOV/11051)

A smartphone displaying a website with a search bar and a button that says 'Suchen'. Below the search bar, there is a notification that says 'Angepasste Injektionen bringen womöglich wenig'. The background of the smartphone screen is white with a blue header.

Alle Artikel auch digital  
auf **Spektrum.de**  
Auf **Spektrum.de** berichten  
unsere Redakteure täglich  
aus der Wissenschaft: fundiert,  
aktuell, exklusiv.

# SPEKTROGRAMM

---



MIT FOT. GEH. VON M.T. AGUIAR UND G. PONS, SEBILLES, BEARBEITUNG, SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



## EIN BIZARRER WURM

▶ Mit seinen vielen Verzweigungen sieht der Wurm *Ramissyllis kingghidorahi* aus wie ein Fantasiewesen – da passt es, dass er nach dem Filmmonster »King Ghidorah« benannt wurde, einem dreiköpfigen Drachen. *R. kingghidorahi* besitzt zwar nur einen Kopf, dafür aber zahlreiche Enden. Er zählt zu den Ringelwürmern und kommt vor der japanischen Insel Sado vor, wo ihn ein Team um Teresa Aguado von der Universität Göttingen entdeckt hat. Dort lebt er im inneren Röhrensystem von Schwämmen. Bisher sind nur zwei weitere Arten verästelter Ringelwürmer bekannt: die Tiefsee-Spezies *Syllis ramosa* sowie *Ramissyllis multicaudata*, die in den Gewässern vor Australien siedelt.

Genetische Analysen belegen, dass *R. kingghidorahi* und *R. multicaudata* einen gemeinsamen Vorfahren haben. Von diesem erbten sie vermutlich den verzweigten Körperbau, der dafür geeignet ist, sich im inneren Röhrenlabyrinth von Schwämmen festzusetzen und dort zu überdauern.

*Organisms Diversity & Evolution* 10.1007/s13127-021-00538-4, 2022



**WIEDER ZU FUSS**  
Technisch unterstützt übt ein Gelähmter zu laufen.

## MEDIZIN IMPLANTAT LÄSST QUERSCHNITTGELÄHMTE WIEDER LAUFEN

► Eine Forschergruppe der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) stellt die nächste Generation eines technischen Systems vor, das vollständig Querschnittgelähmte wieder laufen lässt. Das Team um Jocelyne Bloch und Grégoire Courtine implantierte drei Patienten eine Folie in den Wirbelkanal, auf der 16 kleine Elektroden angeordnet waren. Damit ließen sich elektrische Signale von einem Computer an Motoneurone im Rückenmark weiterleiten. Das erlaubte es, die Muskeln im Bein und im Rumpf gezielt zu aktivieren. Das Elektrodenimplantat und die Steuersignale müssen hierfür an jeden Betroffenen individuell angepasst werden.

Laut dem Team konnten die Patienten wenige Stunden nach Aktivierung des Implantats erste Muskelbewegungen hervorrufen und während des ersten Tags bereits einige Schritte

gehen. Durch geduldiges Training ließ sich das noch erheblich steigern. Nach mehreren Monaten hätten die Betroffenen unter Nutzung von Gehhilfen stundenweise stehen und laufen sowie Treppen steigen können. Auch in die Pedale treten und schwimmen soll möglich sein. Das sei umso bemerkenswerter, da die Patienten an einer vollständigen Querschnittlähmung in Brusthöhe litten, deren Beginn ein bis neun Jahre zurücklag.

Allerdings erlaubt das System es nicht, die Bewegungen willkürlich auszuführen; sie müssen über einen Tabletcomputer angesteuert werden. Dazu wählt der Patient das gewünschte Bewegungsprogramm und sendet es an einen im Bauchraum implantierten Computer. Dann ergreift er eine Gehhilfe, beispielsweise einen Rollator, und drückt einen Knopf am Handgriff, während er sich darauf konzentriert, einen Schritt mit dem linken Bein zu

machen. »Wie von Geisterhand« hebe sich dann das Bein und setze einige Zentimeter weiter auf, beschreiben die Forscher. Anschließend folgt das gleiche Prozedere mit der anderen Körperseite.

Schon im Jahr 2018 hatten die Forscher die grundsätzliche Machbarkeit ihres Verfahrens bewiesen. Damals testeten sie es aber noch an Patienten, denen eine Restbeweglichkeit der unteren Gliedmaßen geblieben war. Auch die neueste Version der Technik sei nicht für alle Querschnittgelähmten geeignet, betont Winfried Mayr von der Medizinischen Universität Wien. Sie funktioniere nur bei ganz bestimmten Ausprägungen der Verletzung, und diese seien bei vielen Betroffenen nicht gegeben.

*Nature Medicine 10.1038/s41591-021-01663-5, 2022*

## MATERIALWISSENSCHAFT NEUE MAGNETISCHE SUBSTANZ BRICHT REKORDE

► Eine ungewöhnliche Bindung zwischen Metallen der seltenen Erden verleiht einer neu entwickelten Substanz überragende Eigenschaften. Wissenschaftler um Colin A. Gould von der University of California in Berkeley haben Moleküle geschaffen, in denen zwei Atome eines Seltenerd-elements – etwa Dysprosium oder Terbium – aneinander gekoppelt sind, wobei ihre Bindungsachse mitten durch das Zentrum eines Dreiecks führt, das drei Jodatome aufspannen. Nach Angaben des Teams sorgt diese Konstruktion für einen extrem kräftigen Magnetismus.

Ein Stoff übt starke magnetische Wirkung aus, wenn er einerseits viele ungepaarte Elektronen enthält, deren

magnetisches Moment nicht von entgegengesetzt orientierten Partner-elektronen aufgehoben wird, und andererseits diese Elektronen alle gleich orientiert sind. Metalle der seltenen Erden weisen viele ungepaarte Elektronen auf, die sich durch Bindung etwa an Eisen gemeinsam ausrichten lassen. Nutzt man als Bindungspartner ein weiteres Seltenerdelement, sind theoretisch noch viel stärkere Magnete möglich. Das lässt sich jedoch nur schwer umsetzen; in der neu entwickelten Substanz beispielsweise fällt die Verbindung derart schwach aus, dass sie von den dreiecksförmig angeordneten Jodatomen zusammengehalten werden muss. Der Lohn der Mühe: In der Mitte

zwischen den beiden Seltenerd-Atomen befindet sich ein ungepaartes Elektron. Dieses richtet alle weiteren ungepaarten Elektronen des Duos aus, was dem gesamten Molekül eine außerordentliche magnetische Wirkung verschafft.

Die so genannte Koerzitivfeldstärke gibt an, wie stark ein äußeres Magnetfeld sein muss, um den inneren Magnetismus eines Stoffs zu überwinden. Bei der neuen Substanz beträgt sie (mit zwei Terbium-Atomen als Bindungspartner und bei einer Temperatur von etwa 60 Kelvin) mehr als 25 Tesla. Das liegt deutlich über dem Dreifachen des bisherigen Rekordwerts von 7,9 Tesla.

*Science* 10.1126/science.abc15470, 2022

## ASTRONOMIE RIESIGER KOMET AUS DER OORTSCHEN WOLKE

► Im Juni 2021 haben Astronomen einen großen Kometenkern namens C/2014 UN271 (Bernardinelli-Bernstein) entdeckt. Er war seinerzeit so weit entfernt wie der Uranus, bewegte sich aber erkennbar in Richtung Sonne. Auf Grund seiner außergewöhnlichen Helligkeit nahmen Fachleute schon damals an, dass es sich um ein sehr großes Objekt aus der Oortschen Wolke handeln müsse. Ein Team um Emmanuel Lellouch vom Observatoire de Paris bestätigt nun die riesigen Dimensionen des Himmelskörpers. Dessen fester Kern besitzt demzufolge einen Durchmesser von 137 Kilometern. Es handle sich um das bei Weitem größte Objekt aus der Oortschen Wolke, das je beobachtet wurde, sowie den zweitgrößten bekannten Kometen des Sonnensystems, wie die Wissenschaftler schreiben.

Mit Hilfe des Radioteleskop-Observatoriums Alma (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) in Chile hat das Team die Wärmeabstrahlung des

Himmelskörpers gemessen. Daraus ließ sich berechnen, wie groß sein fester Kern innerhalb der Koma aus Gas und Staub ist. Der Brocken reflektiert etwa fünf Prozent des Lichts, das auf seine Oberfläche trifft. Sein Rückstrahlvermögen ähnelt somit dem von Steinkohle, was auch auf andere Kometenkerne zutrifft.

Einige frühere Schätzungen gingen davon aus, dass C/2014 UN271 bis zu 370 Kilometer Durchmesser habe. Die neue Studie weist ihm deutlich geringere Abmessungen zu; dennoch ist er immer noch doppelt so groß wie der bisherige Spitzenreiter Hale-Bopp, der im Jahr 1997 gut sichtbar durchs Sonnensystem zog. Als größter bekannter Komet gilt (2060) Chiron mit einem Durchmesser von weit über

200 Kilometern. Dieser gehört allerdings zu den so genannten Zentauren, die zwischen den Umlaufbahnen von Jupiter und Neptun kreisen und damit nicht der Oortschen Wolke angehören.

Seinen sonnennächsten Bahnpunkt erreicht C/2014 UN271 im Jahr 2031. Dann wird ihn das Zehnfache der Erde-Sonne-Distanz von unserem Zentralstern trennen. Wahrscheinlich enthält der Komet diverse Stoffe aus der Frühzeit des Planetensystems, weshalb Fachleute daran interessiert sein dürften, ihn per Fernerkundung zu untersuchen. Jedoch ist er selbst bei größter Sonnennähe immer noch sehr weit draußen, daher wird er kein spektakuläres Himmelschauspiel à la Hale-Bopp bieten.

*arXiv* 2201.13188, 2022



**KOLOSS IM KOSMOS** Den Kometen C/2014 UN271 sähe man ungern auf Kollisionskurs mit der Erde.

## ÖKOLOGIE GRÜNES LICHT REDUZIERT FISCHEREI- BEIFANG ERHEBLICH

► Grüne LED-Lämpchen alle zehn Meter an einem Stellnetz angebracht – mehr braucht es offenbar nicht, um den Beifang deutlich zu reduzieren. Das Licht hält Haie, Rochen, Kalmare und Meeresschildkröten davon ab, sich im Netz zu verheddern. Zugleich bleibt die Fangmenge des gewünschten Speisefischs unverändert. Das geht aus einer Studie hervor, für die eine Arbeitsgruppe um Jesse Senko von der Arizona State University insgesamt 28 Paare von Netzen vor der kalifornischen Küste auslegte. Jeweils ein Netz war mit den Lampen bestückt, das andere nicht.

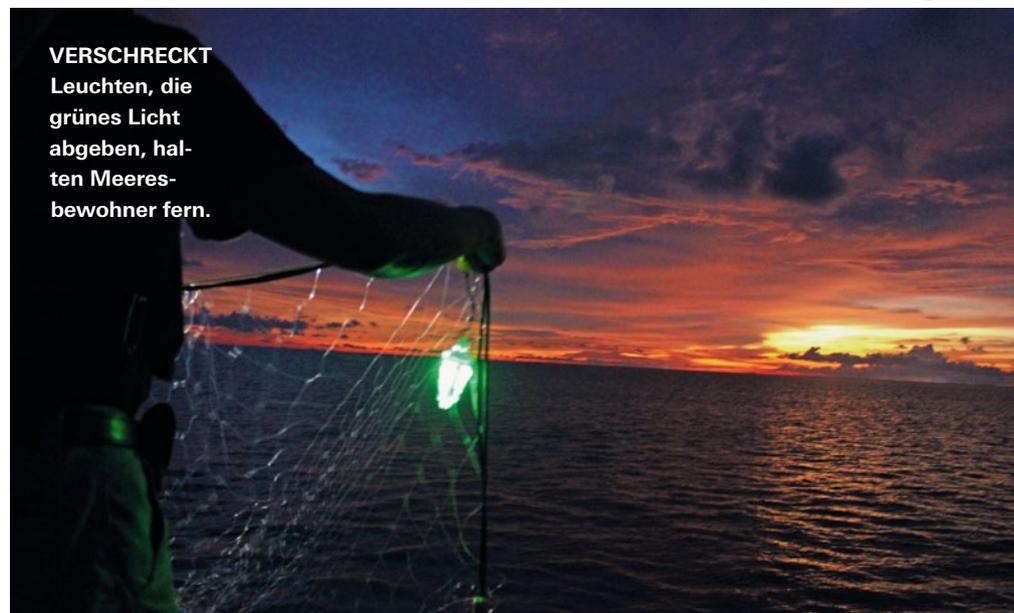
Den Ergebnissen zufolge senkt das grüne Licht die Beifangmenge insgesamt um mehr als 60 Prozent. Bei den Meeresschildkröten betrug der Rückgang rund 50 Prozent, bei Humboldt-Kalmaren etwa 80 Prozent und bei Haien und Rochen ganze 95 Prozent. Die Fischer benötigten somit deutlich weniger Zeit, um den Beifang beim Einholen der Netze auszusortieren – eine mitunter gefährliche Tätigkeit. Dadurch konnten die Boote zirka eine Stunde früher heimkehren.

Stellnetze seien günstig und würden vor allem in kleinen Fischereibe-

trieben genutzt, schreiben die Forscher. Mit Hilfe von Schwimmern werde das Maschenwerk in die gewünschte Tiefe gebracht und dann eine Zeit lang sich selbst überlassen. Neben den Fischen, die man eigentlich fangen will, verheddern sich aber viele weitere Meereslebewesen darin. Schildkröten oder Meeressäuger ertrinken hierbei meist, für Haie und Rochen bedeutet es oft ebenfalls den Tod. Warum grüne Lichter nur sie, nicht aber die Speisefische davon abhalten, ins Netz zu gehen, ist unklar. Eine Rolle spielt vermutlich, dass sie die Leuchten besser erkennen.

Schon 2016 haben einige der Forscher die Wirkung grünen Lichts auf den Fischfang beobachtet. Die neue Studie dokumentiert den Effekt nun ausführlicher. Aktuell kostete es ungefähr 140 US-Dollar (123 Euro), ein Stellnetz mit den Lichtern auszurüsten, rechnet Senko vor. Das könnte für viele Kleinstbetriebe noch zu teuer sein. Eine weiterentwickelte technische Lösung ließe sich aber womöglich direkt ab Werk in den Netzen verbauen, was die Kosten senken würde.

*Current Biology 10.1016/j.cub.2021.12.050, 2022*



**VERSCHRECKT**  
Leuchten, die  
grünes Licht  
abgeben, hal-  
ten Meeres-  
bewohner fern.

## KOSMOLOGIE 40 TRILLIONEN SCHWARZE LÖCHER

► Im beobachtbaren Universum gibt es rund 4 mal  $10^{19}$  – also 40 Trillionen Schwarze Löcher. Das geht aus einer Simulation hervor, mit der Astronomen abgeschätzt haben, wie viele Sterne und Galaxien bis heute im Universum entstanden sind. Aus der Häufigkeit bestimmter Sterntypen und deren Lebenszyklus lässt sich ermitteln, wie viele jener Himmelskörper mittlerweile zu Schwarzen Löchern geworden sein müssen. Dabei kam das Team um Alex Sicilia von der Forschungseinrichtung SISSA im

italienischen Triest zu dem genannten Ergebnis.

Die Forscher betrachteten speziell die so genannten stellaren Schwarzen Löcher. Solche Objekte entstehen, wenn Einfach- oder Doppelsterne, die mindestens dreimal so massereich sind wie unsere Sonne, am Ende ihres Lebens kollabieren. Daneben existieren weitere Arten, etwa die supermassereichen Schwarzen Löcher mit einigen Millionen bis Milliarden Sonnenmassen, die sich im Zentrum von Galaxien finden. Deren Häufigkeit

wollen sich Sicilia und Kollegen in einer Folgestudie widmen.

Rund ein Prozent der gewöhnlichen (»baryonischen«) Materie im Universum stecke in Schwarzen Löchern, so das Fazit der Astronomen. Sie hoffen, dass ihre Studie hilft, die Geschichte des Universums zu rekonstruieren, indem sie Erkenntnisse über die relativ kleinen Vertreter dieser Massemonster liefert, aus denen einst die supermassereichen Exemplare hervorgegangen sind.

*The Astrophysical Journal 10.3847/1538-4357/ac34fb, 2022*

## CHEMIE PEPTIDE KÖNNEN IM WELTALL ENTSTEHEN

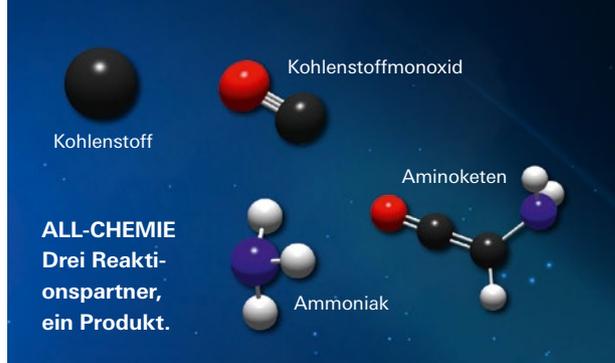
Ein ungewöhnlicher chemischer Reaktionsablauf könnte im Weltall Peptide hervorbringen: kurze Ketten aus Aminosäuren, aus denen auch Proteine bestehen. Forscherinnen und Forscher um Serge Krasnokutski vom Max-Planck-Institut für Astronomie haben den Reaktionstyp entdeckt, der sich auf der eisigen Oberfläche kosmischer Staubkörner abspielen könnte. Dabei dienen einzelne Kohlenstoffatome als »Klebstoff« zwischen Kohlenstoffmonoxid und Ammoniak – zwei Substanzen, die in interstellaren Molekülwolken häufig vorkommen. Infolge der Reaktion entsteht das Molekül Aminoketen, das sich von der Aminosäure Glycin nur durch eine fehlende  $H_2O$ -Verbindung unterscheidet. Es verkettet sich anschließend zu Peptiden aus miteinander verknüpften Glycin-Resten.

Spontane Peptidbildung im interstellaren Raum erschien bisher unwahrscheinlich, da sich Aminosäuren nicht leicht zu Peptiden zusammenfin-

den. Hierfür muss ein Wassermolekül abgespalten werden, was Energie erfordert, die in kalten interstellaren Molekülwolken kaum verfügbar ist. Mit dem neuen Reaktionstyp fällt diese Hürde weg, da die Peptid-Bausteine, hier das Aminoketen, das Wassermolekül gar nicht erst enthalten.

Mit Hilfe quantenchemischer Berechnungen zeigte die Arbeitsgruppe: Aminoketen kann auf der eisigen Oberfläche kosmischer Staubkörner in zwei Schritten entstehen. Zunächst reagiert ein einzelnes, chemisch aggressives Kohlenstoffatom mit Ammoniak zum seinerseits reaktionsfreudigen Zwischenprodukt  $H_2NCH$ , das sich anschließend mit Kohlenstoffmonoxid spontan zum Aminoketen  $H_2NCH=CO$  verbindet.

Um das experimentell nachzuweisen, dampften die Forscher Kohlenstoffmonoxid, Ammoniak und Kohlenstoffatome auf eine 10 Kelvin kalte Testoberfläche, die das Äußere eines kosmischen Staubkorns simulierte. Spektroskopische Messungen zeigten, dass sich unter diesen Bedingungen



S. KRASNOKUTSKI / MPA-GRAFIKABTEILUNG;  
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

tatsächlich Aminoketen-Moleküle formieren. Bei einer Erwärmung auf 110 Kelvin tauchten die typischen Messsignale von Peptiden auf – offenbar hatten sich die Moleküle untereinander verkettet. Eine solche Temperaturzunahme tritt im All etwa auf, wenn in der Nähe ein neuer Stern entsteht.

Der neue Reaktionstyp verlängert die Liste bekannter Mechanismen, die Biomoleküle im interstellaren Raum hervorbringen. Relativ komplexe Bausteine des Lebens könnten auf kosmischen Staubkörnern vorhanden sein. Bedeutsam ist vor allem, dass die Abspaltung von Wasser während der Peptidbildung nicht das große Hindernis zu sein scheint, als das sie lange galt. Auch für Nukleinsäuren (Bausteine der Erbsubstanz) kennen Forscher mittlerweile Entstehungsmechanismen ohne Abspaltung von Wasser.

*Nature Astronomy* 10.1038/s41550-021-01577-9, 2022

## GEOWISSENSCHAFTEN GLETSCHERDICKE AUS DEM ALL GEMESSEN

Wer wissen möchte, wie dick ein Gletscher ist, musste sich bislang Steigeisen unterschnallen oder das Schneemobil anwerfen. Ein auf die Schneeoberfläche gestelltes Georadar erlaubt den Blick unter die Eisdecke bis zum Fels darunter und ermöglicht es, die Gletscherdicke zu erfassen. Da viele Eisfelder aber schwer zugänglich sind, haben Forscher bislang nur einen kleinen Teil von ihnen vermessen. Nun stellt eine französische Arbeitsgruppe um Romain Millan von der Université Grenoble Alpes ein Verfahren vor, um die Mächtigkeit von Gletschern mit Hilfe hochauflösender Satellitendaten

zu bestimmen. Die neue Methode lässt selbst in entlegenen Regionen präzise Messungen zu.

Millan und seine Kollegen ermittelten die Dicke für 98 Prozent der weltweiten Gletscherfläche. Ein enormer Fortschritt: Lokale Radarmessungen gab es bislang für gerade einmal 40 Prozent jener Fläche. Hierfür wertete das Team hunderttausende Bilder aus, erstellt von den Erdbeobachtungssatelliten Landsat 8, Sentinel-2 und Sentinel-1 in den Jahren 2017 und 2018. Auf je zwei Aufnahmen des gleichen Gebiets zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmten die Forscher, wie weit sich das Eis hangabwärts bewegt hatte. Mit einem mathematischen Modell schätzten sie anhand der Ausdehnung und des Fließtempos die Dicke ab.

Das gesamte weltweite Gletschervolumen beziffert die Gruppe auf grob

überschlagen 140000 Kubikkilometer. Sollte dieses Eis infolge des Klimawandels komplett abschmelzen, würde der Meeresspiegel um rund 25 Zentimeter steigen. Frühere Abschätzungen hatten etwa 20 Prozent höhere Werte ergeben. Der Unterschied erklärt sich daraus, dass Millan und sein Team einige antarktische Gletscher dem antarktischen Eisschild zuschlugen – sie fallen so aus der Kategorie Gletscher heraus.

Die rasante Schmelze, etwa in den Anden und im Himalaja, bedroht auch die Süßwasserversorgung der lokalen Bevölkerung. Gletscher in Höhenlagen speichern Wasser, das Talbewohner in niederschlagsarmen Zeiten brauchen. Tauen sie, bilden sich zudem Schmelzwasserseen, die unvorhergesehen auslaufen können und sich dann als Sturzflut ins Tal ergießen.

*Nature Geoscience* 10.1038/s41561-021-00885-z, 2022



# LANGLANDS-PROGRAMM DIE VEREINHEITLICHUNG DER MATHEMATIK

Das vor 55 Jahren gegründete Langlands-Programm soll verschiedenste Bereiche der Mathematik zusammenführen. Diese Brücken zu bauen, ist allerdings alles andere als einfach. Nun haben zwei Forscher einen enormen Fortschritt erzielt, indem sie eine Verbindung zwischen der Zahlentheorie und der Geometrie gefunden haben.



Kevin Hartnett ist Wissenschaftsjournalist in Columbia, South Carolina.

► [spektrum.de/artikel/1989085](https://spektrum.de/artikel/1989085)

**SELTSAME VERBINDUNG**  
Auf der einen Seite Zahlen,  
auf der anderen geometrische Figuren.

$$f(x) = 2x + 1$$

Das größte Projekt in der Mathematik hat im Februar 2021 ein seltenes Geschenk erhalten: Eine 350-seitige Arbeit, welche die Art und Weise verändern wird, wie die Fachwelt einige der tiefgründigsten Fragen des Bereichs untersucht. Der Fachaufsatz enthält ein neuartiges geometrisches Objekt, das eine Verbindung zwischen der Geometrie und der Zahlentheorie herstellt. »Das eröffnet unglaublich viele Möglichkeiten. Die Methoden sind so neu, dass sie nur darauf warten, erforscht zu werden«, so der Algebraiker Tasho Kaletha von der University of Michigan.

Die Autoren des Aufsehen erregenden Aufsatzes sind Laurent Fargues vom Institut de Mathématiques de Jussieu in Paris und sein Kollege Peter Scholze von der Universität Bonn, der 2018 die Fields-Medaille erhielt, eine der bedeutendsten Auszeichnungen in der Mathematik. Die zwei Forscher haben ein neues Gebiet im langjährigen Langlands-Programm offenbart, das versucht, unterschiedliche mathematische Zweige miteinander zu verbinden. Sie eröffnen damit die Möglichkeit, völlig anders über Fragen nachzudenken, die seit Jahrhunderten untersucht werden.

Im Mittelpunkt der Veröffentlichung steht ein wiederbelebtes geometrisches Objekt namens Fargues-Fontaine-Kurve. Fargues und Jean-Marc Fontaine, der bis zu seinem Tod im Jahr 2019 Professor an der Université Paris-Sud war, entwickelten sie erstmals vor mehr als zehn Jahren. Und nun erreicht das Objekt endlich seine vollständige Form. »Damals ahnten sie zwar, dass die Kurve interessant und wichtig ist, aber sie wussten nicht, auf welche Weise«, erklärt die Mathematikerin Eva Viehmann von der Technischen Universität München.

Die Kurve hätte in irgendeiner Ecke der Mathematik untergehen können, doch 2014 haben Fargues und Scholze sie in den Mittelpunkt ihres Fachgebiets gerückt. In den folgenden sieben Jahren arbeiteten sie die grundlegenden Details aus, um die Figur an eine Theorie von Scholze anzupassen. Das Ergebnis schlägt nicht einfach bloß große Wellen, sondern lässt die Bereiche der Zahlentheorie und der Geometrie erbeben. »Es ist eine Art Wurmloch zwischen zwei verschiedenen Welten«, sagt Scholze. »Sie werden dadurch irgendwie zu ein und derselben Sache.«

Das Langlands-Programm ist ein überaus ehrgeiziges Projekt, das mit einem einfachen Anliegen beginnt: Lösungen für Polynomgleichungen wie  $x^2 - 2 = 0$  und  $x^4 - 10x^2 + 22 = 0$  zu finden. Man bestimmt also deren Nullstellen, das heißt, die Werte von  $x$ , welche die Terme gleich null setzen ( $x = \sqrt{2}$  und  $-\sqrt{2}$  für das erste Beispiel sowie  $x = \pm\sqrt{5 \pm \sqrt{3}}$  für das zweite).

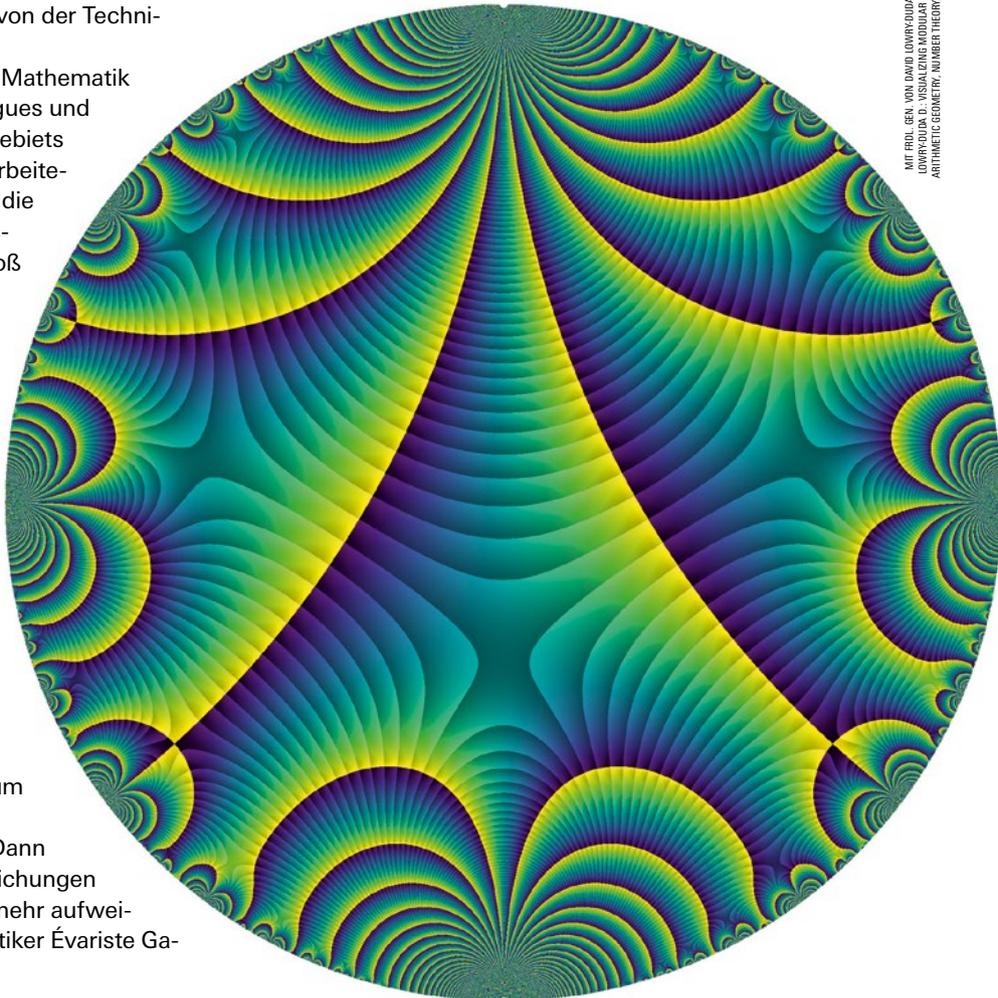
Um das Jahr 1500 fand man Formeln zum Berechnen der Nullstellen von Polynomen, deren höchste Potenzen 2, 3 oder 4 sind. Dann suchte man nach Lösungen für solche Gleichungen mit Variablen, die eine Potenz von 5 oder mehr aufweisen. Doch 1832 stellte der junge Mathematiker Évariste Ga-

lois fest, dass die Suche zum Scheitern verdammt ist. Denn wie er bewies, existiert keine allgemeine Methode, um die Nullstellen von Polynomen höherer Potenzen als vier zu ermitteln.

Doch Galois gab sich mit dem ernüchternden Ergebnis nicht zufrieden. Wenige Monate vor seinem tragischen Tod bei einem Duell im Jahr 1832, als er gerade einmal 20 Jahre alt war, entwickelte er eine neue Theorie der Polynomlösungen. Anstatt die Nullstellen exakt zu berechnen – was in den meisten Fällen ja nicht möglich ist – schlug er vor, nach Symmetrien zwischen den Nullstellen zu suchen. Diese Transformationen packte er in ein neues mathematisches Objekt, das inzwischen als Galoisgruppe bekannt ist.

Für das Beispiel von  $x^2 - 2$  enthält die dazugehörige Galoisgruppe nicht direkt die Werte der Nullstellen, sie gibt aber an, dass sie stets gespiegelt auftreten. In diesem Fall sind sie an der  $y$ -Achse gespiegelt. »Algebraiker mussten sich von expliziten Formeln lösen, weil sie im Normalfall nicht existieren«, erklärt der Mathematiker Brian Conrad von der Stanford University. »Die Galoisgruppe ermöglicht es, die Beziehungen zwischen den Nullstellen zu berechnen.«

**MODULARE FORM** Auf einer Scheibe abgebildet entfaltet die hochsymmetrische Funktion ihre volle Pracht.



MIT FRIEDRICH VON GAUß UND DAVID HILBERT: ERSTELLT MIT TECHNIKEN AUS  
LOWRY-DUDA D. VISUALIZING MODULAR FORMS. SIMONS SYMPOSIUM ON  
ARITHMETIC GEOMETRY, NUMBER THEORY, AND COMPUTATIONAL. 2022

Im Lauf des 20. Jahrhunderts haben Fachleute verschiedene Wege entwickelt, um Galoisgruppen zu untersuchen und dadurch mehr über die zu Grunde liegenden Polynome herauszufinden. Eine Strategie besteht darin, ein Wörterbuch zu erstellen, das zwischen den Gruppen und anderen Objekten (oft Funktionen aus der Analysis) übersetzt. Anstatt direkt mit den komplizierten Galoisgruppen zu arbeiten, kann man sich den einfacheren Funktionen widmen. Das ist die grundlegende Idee des Langlands-Programms.

Das Projekt begann 1967, als Robert Langlands einen Brief an seinen berühmten Kollegen André Weil (1906–1998) schrieb. Er äußerte darin seine Vermutung, dass es einen Weg geben müsse, jede Galoisgruppe mit einem gänzlich anderen Objekt, einer so genannten modularen Form, zu verbinden. Während die Gruppen aus der Algebra stammen, gehören modulare Formen zur Analysis, einem völlig unterschiedlichen Zweig der Mathematik, in dem es unter anderem um Infinitesimalrechnung geht.

Fortschritte in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts hatten genügend Ähnlichkeiten zwischen den beiden Bereichen offengelegt, um Langlands einen tieferen Zusammenhang zwischen ihnen vermuten zu lassen. Wenn es gelänge, die nach ihm benannte Korrespondenz zu beweisen, könnte man alle Arten von Polynomen mit den mächtigen Werkzeugen der Analysis untersuchen.

Die vermutete Verbindung ist so grundlegend, dass ihre Lösung einige der größten offenen Rätsel der Zahlentheorie betreffen könnte. Dazu zählen unter anderem drei von sechs ungelösten Millennium-Problemen, deren Beilegung mit einem Preisgeld von einer Million US-Dollar dotiert ist: die Riemannsche Vermutung, die Birch-Swinnerton-Dyer-Vermutung und die Hodge-Vermutung.

### Eine geometrische Sichtweise annehmen

Angesichts der weit reichenden Bedeutung waren zahlreiche Mathematiker motiviert, sich den Bemühungen anzuschließen und Langlands' ursprüngliche Hypothesen weiterzuentwickeln. Inzwischen hat sich das Projekt zu dem größten und umfangreichsten Unterfangen des Fachs entwickelt. »Das Langlands-Programm ist ein Netzwerk aus Vermutungen, die fast jeden Bereich der Mathematik betreffen«, erklärt die Mathematikerin Ana Caraiani vom Imperial College in London (siehe Interview S. 19).

Eine Erweiterung des Gebiets ergab sich Anfang der 1980er Jahre, als Vladimir Drinfeld und später Alexander Beilinson vorschlugen, die Verbindungen von Langlands mit Hilfe von geometrischen Begriffen zu interpretieren. Die Übersetzung von Zahlen in Geometrie ist oft schwierig, aber wenn sie funktioniert, kann sie die Inhalte extrem vereinfachen.

Zum Beispiel nimmt die Frage danach, ob eine Zahl einen Primfaktor hat, der mehrmals auftaucht, geometrisch betrachtet eine viel einfachere Form an. 12 lässt sich etwa als Produkt von  $2 \times 2 \times 3$  schreiben, während bei 15 jeder Faktor nur einmal auftritt ( $3 \times 5$ ). Im Allgemeinen gibt es keinen schnellen Weg, um herauszufinden, ob eine Zahl wiederholte Primfaktoren hat. Die Fragestellung lässt sich aber in ein geometrisches Problem übersetzen, indem man

## AUF EINEN BLICK EIN WEGWEISENDER ERFOLG

- 1 Bereits 1967 hatte Robert Langlands vermutet, dass es zwischen einigen scheinbar unabhängigen Bereichen der Mathematik, etwa der Analysis und der Zahlentheorie, Verbindungen geben könnte.
- 2 Seitdem arbeiten zahlreiche Fachleute unermüdlich daran, Brücken zwischen den Gebieten zu bauen. Inzwischen zählt das Langlands-Programm zu den ambitioniertesten Unternehmungen des Fachs.
- 3 Zwei Forscher konnten nun ein kompliziertes geometrisches Objekt konstruieren, das einen Zusammenhang zwischen der Zahlentheorie und der Geometrie offenlegt. Damit eröffnen sie ungeahnte neue Möglichkeiten.

sich Polynomen zuwendet, denn diese teilen viele Eigenschaften mit Zahlen. Man kann sie ebenfalls addieren, subtrahieren, multiplizieren und dividieren. Zudem gibt es Primpolynome, die ähnliche Merkmale der Unteilbarkeit besitzen. Im Gegensatz zu Zahlen haben Polynome ein klares geometrisches Erscheinungsbild. Man kann ihre Lösungen grafisch darstellen und die Kurven untersuchen, um mehr über sie zu erfahren.

Wenn der Graph etwa die x-Achse an einem Punkt berührt, ohne sie zu schneiden, dann hat das dazugehörige Polynom einen wiederholten Primfaktor. Das ist nur ein Beispiel dafür, wie eine komplizierte arithmetische Frage eine visuelle Bedeutung erhält, wenn man sie in ihre Entsprechung für Polynome umwandelt.

Das geometrische Langlands-Programm, wie es später genannt wurde, zielt darauf ab, Figuren mit bestimmten Eigenschaften zu finden, die für die Galoisgruppen und modularen Formen in Langlands' Vermutungen stehen könnten. Eine analoge Übereinstimmung in dieser neuen geometrischen Umgebung könnte nützliche Denkansätze liefern. Es war eine schöne Vision, aber auch eine gewagte – ein bisschen so, als würde man sagen, man könnte das Universum durchqueren, wenn man nur eine Zeitmaschine hätte. »Geometrische Objekte zu schaffen, die eine ähnliche Rolle wie Zahlen spielen, ist sehr schwierig«, sagt Conrad.

Deshalb blieb die geometrische Version jahrzehntelang auf Distanz zum ursprünglichen Langlands-Programm. Beide Projekte hatten zwar dasselbe Ziel, aber es handelte sich um so grundverschiedene Ansätze, dass es keine Möglichkeit gab, sie miteinander zu verbinden. »Arithmetiker schauen verwirrt auf das geometrische Langlands-Programm. Sie sagten, es habe nichts mit ihrem Anliegen zu tun«, so Kaletka.

Die neue Arbeit von Scholze und Fargues erfüllt endlich die Hoffnungen, die in das geometrische Langlands-Programm gesetzt wurden. Sie haben die erste Figur gefunden, deren Eigenschaften direkt mit Langlands' ursprünglichem Anliegen zusammenhängen.

Ausschlaggebend für das weit reichende Ergebnis war ein Kurs, den Scholze im September 2014 an der University of California, Berkeley, unterrichtete. Obwohl er damals erst 26 Jahre alt war, galt er bereits als etablierte Größe in der Welt der Mathematik. Zwei Jahre zuvor hatte er seine Doktorarbeit abgeschlossen, in der er eine neue geometrische Theorie formulierte, die auf von ihm erfundenen Objekten, so genannten perfektoiden Räumen, fußte. Er nutzte diesen Rahmen, um einen Teil eines Problems aus der Zahlentheorie zu lösen, die so genannte Gewichtsmonodromie-Vermutung.

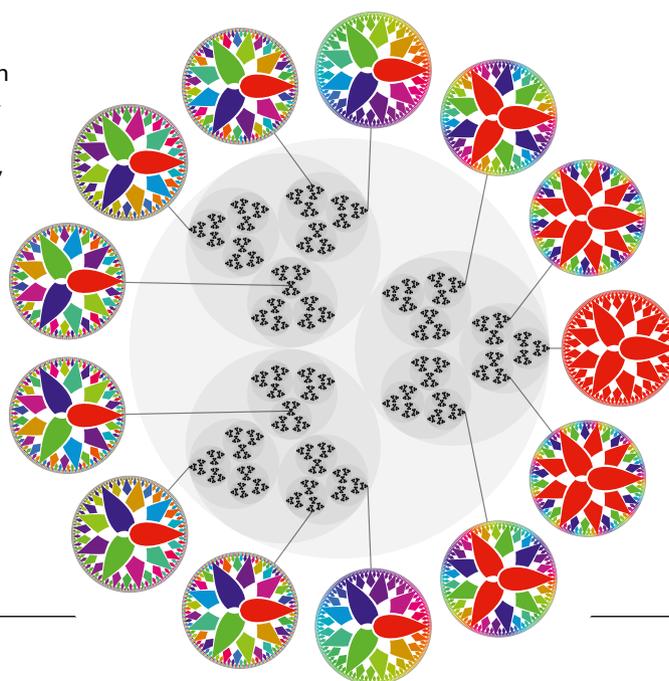
Wichtiger als das eigentliche Ergebnis waren jedoch die Möglichkeiten, die seine Arbeit bot. Es war nicht abzusehen, wie viele andere Fragen sich durch die neue Perspektive beantworten ließen. Der Kurs von Scholze widmete sich einer umfassenderen Version seiner Theorie der perfektoiden Räume. Die Zuhörer füllten die Sitze in dem kleinen Seminarraum, reihten sich entlang der Wände auf und standen sogar auf dem Flur, um ihn sprechen zu hören. »Jeder wollte dabei sein, weil wir alle wussten, dass es sich um revolutionäre Ideen handelte«, erinnert sich David Ben-Zvi von der University of Texas in Austin.

Scholzes Theorie basiert auf speziellen Zahlensystemen, den p-adischen Zahlen. Das »p« steht dabei für Primzahlen. Für jede lässt sich ein eigenes Zahlensystem erzeugen: Es gibt die 2-adischen, 3-adischen, 5-adischen Zahlen und so weiter, die seit über 100 Jahren ein zentrales Werkzeug in der Mathematik bilden. Mit ihnen kann man Fragen zu rationalen Zahlen beantworten, die im Vergleich zu den p-adischen wesentlich unhandlicher sind.

Ihr Vorteil besteht darin, dass sie jeweils auf nur einer einzigen Primzahl basieren. Dadurch haben sie eine einfachere Struktur als rationale Zahlen, die unendlich viele Primzahlen enthalten, ohne dass es ein offensichtli-

ches Muster unter ihnen gibt. Fachleute versuchen oft, grundlegende zahlentheoretische Fragen zunächst in den p-adischen Zahlenräumen zu verstehen, bevor sie die gesammelten Erkenntnisse dann in ihre Untersuchung rationaler Zahlen einfließen lassen.

Alle Zahlensysteme haben eine dazugehörige geometrische Form. Die reellen Zahlen stellt man beispielsweise häufig durch einen Zahlenstrahl dar. Die perfektoiden Räume von Scholze geben den p-adischen Zahlen eine neuartige, nützliche geometrische Erscheinung. Denn dadurch werden sie zu einem noch hilfreicherem Werkzeug, um grundlegende zahlentheoretische Phänomene zu untersuchen, etwa Fragen zu den Lösungen von Polynomgleichungen. »Scholze hat die p-adische Welt neu erdacht und sie in die Geometrie integriert«, sagt Ben-Zvi. »Weil sie so fundamental sind, führt das zu vielen Erkenntnissen.«



MELCHOR: COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKIFILES:P-ADIC INTEGERS WITH LOCAL COORDINATES FROM THE RECONSTRUCTING ORG/UTERLESBY/SAC/03/LEGAL/001

## Ein »einfacheres« Zahlensystem

In der Schule lernen wir, Zahlen in Dezimalschreibweise darzustellen. Wenn man also 542 liest, meint man eigentlich  $5 \cdot 10^2 + 4 \cdot 10^1 + 2 \cdot 10^0$ . Tatsächlich ließe sich jede andere Zahl als Basis wählen, etwa sechs. Dann würde 542 zwar auch existieren, aber einen völlig verschiedenen Wert darstellen, nämlich  $5 \cdot 6^2 + 4 \cdot 6^1 + 2 \cdot 6^0$ , was im Dezimalsystem 206 entspricht. Um Nachkommastellen auf diese Weise auszudrücken, setzt man negative Exponenten ein, etwa:  $0,25 = 2 \cdot 10^{-1} + 5 \cdot 10^{-2}$ . Rationale Zahlen, wie wir sie kennen, haben im Allgemeinen endlich viele

Summanden mit positivem Exponenten und unendlich viele mit negativem (denken Sie zum Beispiel an periodische Zahlen wie  $\frac{1}{3}$ ).

P-adische Zahlen unterscheiden sich nicht nur dadurch, dass die Basis des Zahlensystems eine Primzahl ist, sondern sie verhalten sich bezüglich der Exponenten genau umgekehrt: Sie haben unendlich viele Stellen links vom Komma und nur endlich viele rechts davon.

Wie sich aber herausstellt, bilden diese seltsamen Konstrukte einen Körper, das heißt, man kann die vier

Grundrechenarten (Addition, Subtraktion, Division – bis auf die Null – und Multiplikation) uneingeschränkt ausführen. Zum Beispiel ergibt im Körper der 7-adischen Zahlen  $5 + 1 = 6$  und  $6 + 1 = 10$ . Es gibt aber auch Zahlen wie ...66666, die um 1 erhöht 0 ergeben, weil sich der Übertrag ins Unendliche fortsetzt. So seltsam diese Zahlen anmuten und so nutzlos sie sind, um in der Praxis etwas auszurechnen, erweisen sich ihre Eigenschaften als äußerst hilfreich, um komplizierte zahlentheoretische Strukturen zu untersuchen.

In seinem Berkeley-Kurs stellte Scholze eine allgemeinere Version seiner Theorie von perfektoiden Räume vor, die auf neuen Objekten aufbaut, die er Diamanten nennt. Sein Vorhaben verspricht, die Anwendungsmöglichkeiten von  $p$ -adischen Zahlen drastisch zu erweitern. Doch als Scholze seine Vorlesungsreihe begann, hatte er den Ansatz noch nicht fertig ausgearbeitet. »Er gab den Kurs, während er die Theorie entwickelte. Er kam abends auf Ideen und präsentierte sie morgens frisch aus dem Kopf«, sagt Kaletha. Es war eine virtuose Darbietung.

Zur gleichen Zeit verbrachte Fargues einen Forschungsaufenthalt am Mathematical Sciences Research Institute (MSRI), das sich in der Nähe des Berkeley-Campus befindet, und nahm deshalb ebenfalls an den Vorlesungen teil. Auch er hatte sich in der Vergangenheit mit  $p$ -adischen Zahlen beschäftigt. In den letzten zehn Jahren hatte er mit Jean-Marc Fontaine diesbezüglich an grundlegenden arithmetischen Fragen gearbeitet und ein neues geometrisches Objekt entwickelt. Die so genannte Fargues-Fontaine-Kurve besteht aus Punkten, die jeweils eine Version eines  $p$ -adischen Rings darstellen. In ihrer ursprünglichen Form erwies sich die Kurve als nützliches Werkzeug, aber nicht als etwas, das das gesamte Gebiet erschüttern würde. »Die Kurve schafft Ordnung, so sehe ich es. Bevor sie auftauchte, war es für mich unmöglich, den Überblick über all diese Ringe zu behalten«, so Caraiani.

### Eine scheinbar verrückte Idee liefert den Durchbruch

Während Fargues den Vorträgen von Scholze lauschte, kam ihm der Gedanke, dass die Kurve eine wesentlich größere Rolle in der Mathematik spielen könnte. Das nie verwirklichte Ziel des geometrischen Langlands-Programms bestand darin, eine Figur zu finden, die Antworten auf Fragen der Zahlentheorie liefert. Fargues erkannte, dass seine Kurve in Verbindung mit der  $p$ -adischen Geometrie von Scholze genau diese Eigenschaft erfüllen könnte. Etwa in der Mitte des Semesters nahm er Scholze beiseite und berichtete ihm von seiner Überlegung. Doch Scholze war skeptisch. »Er erwähnte diese Idee bei einer Kaffeepause am MSRI«, erinnert sich Letzterer. »Es war kein sehr langes Gespräch. Zuerst dachte ich, das kann nicht richtig sein.«

Aber die Mathematiker tauschten sich weiter aus, und Scholze erkannte bald, dass der Ansatz vielleicht doch funktionieren könnte. Am 5. Dezember, als sich das Semester allmählich dem Ende zuneigte, hielt Fargues einen Vortrag am MSRI, in dem er eine neue Perspektive für das geometrische Langlands-Programm vorstellte. Er schlug vor, die Fargues-Fontaine-Kurve im Sinne der  $p$ -adischen Geometrie von Scholze zu definieren und mit ihrer Hilfe eine Version der Langlands-Korrespondenz zu beweisen. Der Vorschlag bildete eine letzte, unerwartete Wendung in einer ohnehin schon aufregenden Phase der Mathematik. »Es war wie das große Finale des Semesters. Ich war einfach nur geschockt«, erinnert sich Ben-Zvi.

Bei den ursprünglichen Langlands-Vermutungen geht es darum zu zeigen, dass Darstellungen von Galoisgruppen der rationalen Zahlen mit modularen Formen übereinstimmen. Die  $p$ -adischen Zahlen sind ein anderes Zahlensys-

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



FRANKRAMSPOTT / GETTY IMAGES / ISTOCK

tem, doch auch hierfür gibt es eine Version der Langlands-Vermutungen. Sie behandeln ebenfalls eine Korrespondenz, allerdings zwischen den Darstellungen der Galoisgruppe der  $p$ -adischen Zahlen und Darstellungen von  $p$ -adischen Gruppen.

Im Kern sind beide Verbindungen gleich, auch wenn sie sich um verschiedene Objekte drehen: Man möchte die Lösungen von Polynomen (im ersten Fall basierend auf rationalen Zahlen und im anderen auf  $p$ -adischen Zahlen) durch Strukturen untersuchen, die naiv betrachtet nichts mit den Polynomen zu tun haben. Mathematiker nennen die ursprüngliche Vermutung (für rationale Zahlen) globale Langlands-Korrespondenz, da sie alle Primzahlen enthält. Die Version für  $p$ -adische Zahlen wird hingegen als lokal bezeichnet.

In seinem Vortrag am MSRI schlug Fargues vor, die lokale Langlands-Vermutung mit Hilfe der Fargues-Fontaine-Kurve zu beweisen. Da er und Fontaine die Figur jedoch zu einem völlig anderen Zweck entwickelt hatten, musste man die Geometrie, auf der ihre Definition fußt, erweitern. Erst damit konnte die Kurve die benötigte Struktur und Komplexität erhalten.

Es ist, als würde man eine dreiseitige Figur unabhängig von einer geometrischen Basis definieren. Wenn man diese Form allerdings unter dem Blickwinkel der euklidischen Geometrie betrachtet, erhält sie plötzlich wertvolle Eigenschaften: Man kann trigonometrische Zusammenhänge finden sowie den Satz des Pythagoras und zahlreiche Symmetriebegriffe. Erst mit der entsprechenden Geometrie wird die Figur zu einem vollwertigen Dreieck. »Fargues hat die Idee der Kurve aufgegriffen und die leistungsstarke Geometrie, die Scholze entwickelt hat, genutzt, um die Idee zu vervollständigen«, so Kaletha. »Das erlaubt es, die besonderen Merkmale der Kurve formal zu definieren.«

Fargues' Strategie wurde als Geometrisierung der lokalen Langlands-Korrespondenz bekannt. Doch als er die Idee entwickelte, gab es noch nicht die Werkzeuge, die er für die Umsetzung benötigte. Und normalerweise kommen neue geometrische Theorien nicht jeden Tag auf den Markt. »Fargues' Vermutung war gewagt. Denn er brauchte dafür eine Geometrie, die noch nicht existierte. Aber wie sich herausstellte, war Scholze gerade dabei, sie zu entwickeln«, so Kaletha.

Nach ihrer gemeinsamen Zeit in Berkeley verbrachten Fargues und Scholze die folgenden sieben Jahre damit, eine geometrische Theorie aufzustellen, die es ihnen ermöglichen würde, die Fargues-Fontaine-Kurve in eine geeignete Form zu bringen. Mehrere Schritte führten dazu, dass sie ihr ehrgeiziges Ziel schließlich erreichten. 2017 stellte Scholze eine Arbeit mit dem Titel »Étale Cohomology of Dia-

monds« fertig, in der er viele der wichtigsten Ideen, die er in seinen Berkeley-Vorlesungen vorgestellt hatte, formalisierte. Er kombinierte diesen Aufsatz mit einem anderen umfangreichen Werk, das er mit Dustin Clausen von der Universität Kopenhagen 2020 als Vorlesungsreihe veröffentlichte. Das Material, das insgesamt 352 Seiten umfasste, war nötig, um eine Grundlage für bestimmte Punkte zu schaffen, die in Scholzes Veröffentlichung über Diamanten aufgetaucht waren. »Scholze musste eine ganz andere Theorie aufstellen, die nur dazu diente, einige technische Fragen zu klären, die auf den letzten drei Seiten seiner 2017 erschienen Arbeit auftauchten«, erklärt Kaletha.

### Eine völlig neue Definition geometrischer Objekte

Insgesamt ermöglichten diese und andere Beiträge von Fargues und Scholze, geometrische Objekte völlig neu zu definieren. Angenommen, man hat eine ungeordnete Sammlung von Punkten, eine »Staubwolke«, die man auf eine ganz bestimmte Weise zusammenkleben möchte, um eine gewisse Figur zu erhalten. Die von Fargues und Scholze entwickelte Theorie liefert eine exakte mathematische Anleitung, um das zu tun – wodurch am Ende die Fargues-Fontaine-Kurve entsteht. Und in diesem Fall ist sie genau auf die richtige Weise definiert, um die lokale Langlands-Korrespondenz zu beweisen. »Man muss dafür viele Grundlagen der Geometrie neu aufziehen«, sagt Scholze. »Es hat mich überrascht, dass es überhaupt möglich ist.«

Nachdem sie die Fargues-Fontaine-Kurve konstruiert hatten, widmeten sich die zwei Forscher der nächsten Etappe ihrer Reise: Sie statteten das Objekt mit den nötigen Eigenschaften aus, um zu beweisen, dass die Darstellungen von Galoisgruppen denen von  $p$ -adischen entsprechen. Um zu verstehen, welche Merkmale sie brauchten, kann man zunächst eine einfachere Figur wie einen Kreis betrachten. An jedem Punkt des Kreises ist es möglich, eine Gerade anzulegen, die den Kreis nur einmal in genau diesem Punkt berührt. Jeder Punkt hat eine solche eindeutige Tangente. Die Gesamtheit der Letzteren bildet das so genannte Tangentialbündel, das mit dem ursprünglichen Kreis zusammenhängt. Manchmal kann man solche Bündel einfacher untersuchen als die zu Grunde liegenden Formen.

In ihrer neuen Arbeit konzipierten Fargues und Scholze ein ähnliches Verfahren für die Fargues-Fontaine-Kurve. Sie definierten Möglichkeiten, viele verschiedene geometrische Objekte, die an Tangentialbündel erinnern, zu konstruieren. Ein Beispiel dafür sind so genannte Garben, die mit Punkten auf der Fargues-Fontaine-Kurve zusammenhängen, ähnlich wie Tangenten mit Punkten auf einem Kreis.

Alexander Grothendieck (1928–2014) entwickelte bereits in den 1950er Jahren das Konzept der Garben, die Aufschluss darüber geben, wie algebraische und geometrische Merkmale einer Figur miteinander verbunden sind. Seit Jahrzehnten vermutet man, dass Garben die vielversprechendsten Werkzeuge für das geometrische Langlands-Programm sind. »Man interpretiert die Darstellung von Galoisgruppen in Form von Garben neu«, so Conrad.

Wie beim ursprünglichen Langlands-Programm gibt es auch für die geometrische Version eine lokale (auf  $p$ -adi-

schen Zahlen aufbauend) und eine globale Variante (mit rationalen Zahlen). Fragen zu Garben beziehen sich auf das globale geometrische Programm, von dem Fargues vermutete, dass es sich mit der lokalen Langlands-Korrespondenz verbinden lasse. Allerdings verfügte man bis dahin nicht über die richtigen Arten von Garben, die zu den erwünschten geometrischen Objekten passen. Jetzt haben Fargues und Scholze die fehlenden Konzepte zur Fargues-Fontaine-Kurve bereitgestellt.

Tatsächlich haben sie zwei verschiedene Arten von Garben entwickelt: kohärente Versionen, die den Darstellungen von  $p$ -adischen Gruppen entsprechen, sowie »étale« Garben für die Darstellungen von Galoisgruppen. In ihrer 2021 erschienenen Arbeit haben die zwei Mathematiker gezeigt, dass sich kohärente Garben immer mit étale-artigen verbinden lassen. Folglich ist es stets möglich, die Darstellung einer  $p$ -adischen Gruppe einer der Galoisgruppen zuzuordnen. Damit haben Scholze und Fargues eine Richtung der lokalen Langlands-Korrespondenz bewiesen. Die andere Richtung (von Galoisgruppen zu  $p$ -adischen) bleibt jedoch offen. »Wir wissen nun, wie man von der Darstellung einer  $p$ -adischen Gruppe zu einer von Galoisgruppen gelangt, aber nicht, wie man zurückkommt«, so Scholze.

Trotzdem zählt die Arbeit zu einem der größten Fortschritte im Langlands-Programm. Zudem belegt sie, dass Mathematiker richtiglagen, als sie nach geeigneten geometrischen Werkzeugen suchten. »Die Ergebnisse sind eine großartige Bestätigung für die Arbeit, die Forscherinnen und Forscher jahrzehntelang im Bereich der geometrischen Langlands-Korrespondenz geleistet haben«, so Ben-Zvi.

Darüber hinaus eröffnet die Kurve völlig neue Möglichkeiten für das Langlands-Programms. »Das hat wirklich alles verändert. In den letzten fünf bis acht Jahren haben Scholze und Fargues das ganze Feld revolutioniert«, sagt Viehmann. Der nächste Schritt besteht darin, die andere Richtung der lokalen Langlands-Korrespondenz zu beweisen. Danach bleibt noch die globale Version zu zeigen. Es gibt bisher keine offensichtliche Möglichkeit, die Geometrie der  $p$ -adischen Zahlen in entsprechende Konstruktionen für rationale Zahlen zu übersetzen. Dennoch könnte die neue Entdeckung einen Weg dahin ebnen. »Das ist eine Richtung, die ich wirklich gern einschlagen würde«, äußert Scholze. ◀

### QUELLEN

**Fargues, L., Scholze, P.:** Geometrization of the local Langlands correspondence. ArXiv: 2102.13459, 2021

**Scholze, P.:** Etale cohomology of diamonds. ArXiv: 1709.07343, 2017

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »New Shape Opens ›Wormhole‹ Between Numbers and Geometry« 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.



# INTERVIEW

## DIE BRÜCKENBAUERIN

**Die Mathematikerin Ana Caraiani versucht, Verbindungen zwischen verschiedenen Bereichen herzustellen und damit eines der ehrgeizigsten Projekte ihres Fachs weiterzubringen.**



**Steve Nadis** lebt als Wissenschaftsjournalist in Cambridge, Massachusetts.

» [spektrum.de/artikel/1989088](https://spektrum.de/artikel/1989088)

Der Betreuer von Ana Caraianis Abschlussarbeit an der Princeton University war kein anderer als Andrew Wiles, der 1994 den großen Satz von Fermat bewies. Wiles stellte seiner ehrgeizigen Studentin eine anspruchsvolle Aufgabe, bei der sie jedoch keine nennenswerten Fortschritte machte. Aber sie ließ sich davon nicht entmutigen: »Der Sinn der Übung bestand nicht unbedingt darin, das Problem zu lösen«, erklärt sie. »Ich glaube, Wiles hat mir beigebracht, dass man nicht seine ganze Zeit mit Dingen verbringen sollte, von denen man weiß, wie sie funktionieren. Es lohnt sich, Aufgaben in Angriff zu nehmen, die wirklich schwierig sind, vielleicht sogar zu schwierig.«

Sie habe viel darüber gelernt, wie mathematische Forschung funktioniert. »Man kann nicht immer einen geraden Weg verfolgen. Wenn man bei einem Teil des Problems nicht weiterkommt, geht man zu einem anderen Teil über.« Diese Erfahrung kommt Caraiani nun bei ihrer Arbeit an einem breit angelegten Kooperationsprojekt zugute, das verschiedenste Bereiche ihres Fachs miteinander verbindet. Das so genannte Langlands-Programm, das auf den Werken von Robert Langlands aus den 1960er Jahren aufbaut, ist eines der größten, ehrgeizigsten und anspruchsvollsten Vorhaben der heutigen Mathematik.

Die Professorin und Forschungsstipendiatin der Royal Society am Imperial College London schreckte weder in der Vergangenheit vor Herausforderungen zurück noch tut sie es jetzt. Sie wuchs in Bukarest auf und sah sich dort schon als Kind mit Hindernissen konfrontiert, die nichts mit ihren Fähigkeiten zu tun hatten.

Als Schülerin qualifizierte sie sich 2001 als erste Rumänin seit mehr als zehn Jahren für die Internationale Mathematik-Olympiade und gewann zuerst die Silbermedaille und in den beiden folgenden Wettbewerben Goldmedaillen. Trotz ihres Erfolgs fühlte sie sich aber nicht willkommen: »Einige Leute,

darunter auch Mathematiklehrer, welche die Veranstaltung organisierten, sagten mir, ich solle mir keine Hoffnungen machen«, erinnert sie sich. »Das hat mich dazu angespornt, ihnen das Gegenteil zu beweisen.«

**Frau Professor Caraiani, hat sich die Situation geändert, seit Sie als Schülerin versucht haben, bei der von Männern dominierten Mathematik-Olympiade mitzumachen?**

In der Mittelstufe hat man mich ausdrücklich entmutigt. Heute werden Frauen in dem Bereich glücklicherweise häufig bestärkt. Nichtsdestotrotz sehe ich, wie einige Personen noch immer subtile Formen der Diskriminierung erfahren. Es ist definitiv schwieriger, ein Forschungsprogramm aufzubauen und langfristige Beziehungen zu knüpfen, wenn man von seiner Umgebung als anders wahrgenommen wird. Und es ist schwer, ernst genommen zu werden, wenn man sich ständig beweisen muss. Mir ist klar, dass ich mehr Glück hatte als die meisten anderen. Aber leider ist Mathematik nicht so integrativ, wie sie sein sollte – nicht nur für Frauen, sondern auch für andere Personen aus unterrepräsentierten Gruppen. Das gilt vor allem für mein Fachgebiet, das Langlands-Programm, das so viel Spezialwissen erfordert, dass die Eintrittshürde sehr hoch ist.

**Wie lässt sich das ändern?**

Ich tue, was ich kann, um anderen dabei zu helfen, in diesen erstaunlichen Bereich einzudringen, aber ich habe das Gefühl, es reicht nicht aus. Ich versuche, auf Konferenzen und in meiner eigenen Forschungsgruppe mehr Platz für Frauen – und generell für unterrepräsentierte Personen – zu schaffen. Und ich bin froh, dass meine Gruppe einen höheren Frauenanteil hat, als in dem Bereich üblich ist.

### Was hat Sie zu diesem erstaunlichen Gebiet hingezogen?

Nach meinem Abschluss in Princeton 2007 hat mich mein damaliger Betreuer Wiles ermutigt, in Harvard zu promovieren, wo ich bei Richard Taylor studieren konnte, der ihm bei der Ausarbeitung eines wichtigen Teils des Fermat-Beweises geholfen hatte. Da das Langlands-Programm zu seinem Fachgebiet zählte, war klar, dass auch ich mich damit befassen würde. Aber für mich gab es einen viel größeren Anreiz. Bei der Langlands-Korrespondenz geht es im Wesentlichen darum, Verbindungen zwischen verschiedenen Bereichen des Fachs zu schaffen. Ich mag alle Arten von Mathematik – Zahlentheorie, Analysis, Geometrie, Topologie – und mir wurde klar, dass ich mich nicht nur auf eine Sache beschränken müsste, wenn ich in diesem Gebiet tätig wäre. Wenn wir hier an Vermutungen arbeiten, können wir alles, was wir wissen, in die Waagschale werfen und jedes relevante Werkzeug der gesamten Mathematik nutzen, in der Hoffnung, Fortschritte zu machen.

### Wie sieht ein solcher Fortschritt aus?

Vieles von dem, was meine Kollegen und ich tun, hat mit dem Bau von Brücken zwischen zwei verschiedenen Bereichen zu tun: Auf der einen Seite befinden sich Dinge, die man Galoisgruppen nennt, und auf der anderen sind Objekte wie modulare Formen.

### Fangen wir von vorn an:

#### Was sind Galoisgruppen?

Die Strukturen haben mit Polynomgleichungen wie  $x^2 - 3 = 0$  zu tun. Die Lösungen des Beispiels lauten  $\sqrt{3}$  und  $-\sqrt{3}$ . Es gibt eine offensichtliche Symmetrie zwischen den beiden Zahlen, da sie an der y-Achse gespiegelt auftreten. Die Galoisgruppe enthält nicht die Lösungen von Polynomgleichungen, sondern die Symmetrien ihrer Nullstellen. Sobald man Polynome vom Grad fünf oder höher betrachtet, also mit Termen wie  $x^5$  oder  $y^5$ , werden die Gleichungen sehr kompliziert, und damit auch die Galoisgruppen. So genannte Galoisdarstellungen bilden eine Möglichkeit, alles ein wenig zu vereinfachen. Anstatt die ganze Gruppe zu betrachten, konzentriert man sich nur auf Teile – oder Querschnitte – davon. Das ist so, als würde man ein dreidimensionales Objekt in ein ebenes Bild umwandeln: Die Projektion enthält zwar nicht alle Informationen, welche die ursprüngliche Struktur hatte, aber immer noch genug, um ihnen spannende Geheimnisse zu entlocken.

### Und was liegt auf der anderen Seite der Brücke?

Modulare Formen. Es handelt sich dabei um hochsymmetrische Funktionen in der oberen Hälfte der komplexen Ebene, bei der die x-Achse reelle und die y-Achse imaginäre Werte (Vielfache von  $i$ , der Quadratwurzel aus  $-1$ ) darstellt. Mathematiker betrachten sie als »schöne« Funktionen, weil sie glatt sind, das heißt, sie machen keine abrupten Sprünge und haben keine gezackten Kanten. Man kann die obere komplexe Ebene in kleine Regionen, so genannte Kacheln, unterteilen. Dank der Symmetrie lässt sich, wenn man den Wert der Funktion innerhalb einer Kachel kennt, vorhersagen, welche Werte sie in den anderen annimmt.



## Ana Caraiani

... wurde 1985 in Bukarest geboren. 2001 nahm sie als erste rumänische Frau seit 25 Jahren an der Mathematik-Olympiade teil und gewann die Silbermedaille. Nach ihrem Schulabschluss 2003 wanderte sie in die USA aus, um an der Princeton University zu studieren. Vier Jahre später ging sie nach Harvard, wo sie 2012 promovierte. Inzwischen lehrt sie am Imperial College in London.

### Obwohl diese zwei Objekte völlig unterschiedlich sind, zeigt das Langlands-Programm, dass sie irgendwie gleichwertig sind?

Ja, der Zusammenhang zwischen modularen Formen, die zur Analysis gehören, zu den Galoisdarstellungen aus der Zahlentheorie und der arithmetischen Geometrie wurde erstmals in den 1970er Jahren vermutet, und Forscherinnen und Forscher haben die Verbindungen seither immer weiter ausgebaut.

### Wie genau sieht so ein Zusammenhang aus?

Man kann eine Zahlenfolge auf der Seite der modularen Formen erhalten und dieselbe Folge bei den Galoisdarstellungen durch völlig unterschiedliche Verfahren. Im Grunde genommen muss man die modularen Formen dafür in Sum-

men aus Sinus- und Kosinusfunktionen zerlegen. Aus den Koeffizienten dieser trigonometrischen Gleichungen erhält man dann eine Folge von Zahlen. Von der Galoisseite aus kann man zu der gleichen Folge gelangen, indem man die Lösungen von Polynomgleichungen zählt. Das überrascht mich auch heute immer wieder. Man muss so viel komplizierte Mathematik betreiben, um solche grundverschiedenen Dinge zu verbinden.

### **Das ist also die Brücke von den modularen Formen zu den Galoisgruppen. Funktioniert sie auch umgekehrt?**

Tatsächlich braucht man zwei verschiedene Verbindungen: Denn, wie sich herausstellte, führt die erste nur in eine Richtung, wie eine Einbahnstraße. Wenn man von Galoisdarstellungen zu den symmetrischen Funktionen übergehen will, ist man hingegen auf die Taylor-Wiles-Methode angewiesen, welche die zwei Mathematiker ursprünglich für den Beweis des großen fermatschen Satzes entwickelt haben. Inzwischen können wir also, zumindest für bestimmte Spezialfälle, in beide Richtungen reisen.

### **Warum macht man sich so viel Mühe? Was nutzen die Brücken?**

Einerseits ist es natürlich zufrieden stellend, diese Verbindungen zu finden und eine Gemeinsamkeit zwischen einst getrennten Teilen der Mathematik aufzuzeigen. Andererseits haben sie aber auch einen praktischen Nutzen. Die Lösung eines Problems kann auf der einen Seite einfacher ausfallen als auf der anderen. Bei schwierigen Aufgaben kommt es oft vor, dass man auf einer Seite etwas herausfindet und dann auf die zweite wechselt, um weiter zu kommen. Um bedeutende Theoreme zu beweisen, muss man unter Umständen viele Brücken überqueren, deshalb sollte man sich in beide Richtungen frei bewegen können. Ein großes Ziel des Bereichs ist es, zu verstehen, wie man die Verbindungen in einem allgemeineren Rahmen konstruieren kann. Auf diese Weise ließe sich die Reichweite des Langlands-Programms weiter ausbauen.

### **Wie haben Sie dazu beigetragen?**

Die Taylor-Wiles-Methode besitzt eine erhebliche Einschränkung: Sie funktioniert gut in zwei Dimensionen, aber nicht in drei. 2012 entwickelten Frank Calegari und David Geraghty eine Strategie, um den Ansatz zu verbessern, damit man sie in einer dreidimensionalen Umgebung verwenden kann. Doch dafür musste man zunächst drei Vermutungen beweisen, die sie formuliert hatten. Peter Scholze löste 2013 die erste. Die Brücke von den modularen Formen zur Galoisseite wurde dadurch größer und breiter als die ursprüngliche zweidimensionale Version. Zwei Jahre später erkannten Scholze und ich, dass man einige unserer Erkenntnisse verwenden könnte, um die zweite Vermutung zu lösen. Es gelang uns nicht, sie vollständig zu beweisen, aber wir haben einen viel versprechenden Ansatz entwickelt. Zu diesem Zeitpunkt schlug Taylor vor, einen Workshop am Institute for Advanced Study zu veranstalten, um auf unserer Arbeit aufzubauen und die zweite Hypothese endgültig zu klären.

### **Warum sollten Sie zu diesem Zeitpunkt andere hinzuziehen, anstatt die zweite Vermutung selbst zu lösen?**

Der gesamte Beweis führt von etwas sehr Geometrischem zu etwas sehr Zahlentheoretischem. Scholze und ich haben den geometrischen Teil übernommen, aber wir waren der Meinung, nicht die besten Leute für den zahlentheoretischen Teil zu sein. Wir glaubten, schneller voranzukommen, wenn wir unsere Ideen mit anderen teilten.

### **Hatten Sie Recht?**

Ja. Wir lösten die zweite Vermutung und fanden sogar einen Weg, die dritte zu umgehen. Wir bauten die Brücke in die entgegengesetzte Richtung – von der Galoisseite zur dreidimensionalen Analogie modularer Formen. Die Verbindung funktioniert nicht nur in drei Dimensionen, sondern in beliebig vielen.

### **Wie geht es für Sie jetzt weiter?**

Tatsächlich haben wir nicht die gesamte zweite Vermutung von Calegari und Geraghty bewiesen, sondern nur zwei Spezialfälle davon. Ich arbeite mit James Newton an der Lösung der allgemeinen Version. Zudem bin ich immer noch an der dritten Hypothese dran, auch wenn wir sie umgehen konnten. Aber sie trifft Vorhersagen über so genannte Shimura-Varietäten, an denen ich interessiert bin und die ich besser verstehen möchte.

Darüber hinaus gibt es immer noch einige Fälle, für die wir keine Verbindung zwischen den beiden Seiten kennen, zum Beispiel, wenn man Polynome ohne Einschränkungen und beliebige Zahlensysteme zulässt. Wüssten wir, wie man mit so allgemeinen Situationen umgeht, ließe sich die Reichweite des Langlands-Programms vermutlich weiter ausbauen.

### **Wie weit kann diese Vereinheitlichung letztendlich gehen?**

Ich denke nicht, dass die Langlands-Theorie irgendwann alles in der Mathematik erklären kann, aber ich denke, sie könnte jeden Bereich von ihr zumindest berühren. Abgesehen davon hatte Robert Langlands eine große Vision, als er schon vor Jahrzehnten ein riesiges Netz an Vermutungen formulierte. Je mehr Brücken wir überqueren, desto mehr Hypothesen fallen uns ein, und umso mehr neue Wege können wir beschreiten. Es scheint, als ob jeder Fortschritt, den wir machen, einen besseren Überblick darüber verschafft, wie viel es noch zu tun gibt. Ich glaube nicht, dass das Programm in der nächsten Zeit abgeschlossen wird. ◀

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »The Mathematician Who Delights in Building Bridges« 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.





# MEERESKUNDE

## KINDERSTUBE UNTERM EIS

**Unter dem Schelfeis des antarktischen Weddellmeers versammeln sich Millionen von Eisfischen zur Fortpflanzung. Ihre Nester bilden das weltweit größte Fischbrutgebiet der Erde.**

Ein überraschender Fund gelang einem Team des Bremerhavener Alfred-Wegener-Instituts in der Antarktis. An Bord des Forschungsschiffs »Polarstern« hatten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler um Autun Purser im Februar 2021 den Meeresboden in der Nähe des Filchner-Schelfeis im Süden des Weddellmeers mit einem Kameraschlitten (Ocean Floor Observation and Bathymetry System) erkundet. Als die Crewmitglieder die per Glasfaser übertragenen Livebilder aus etwa 500 Meter Wassertiefe sahen, trauten sie kaum ihren Augen: Ein riesiges Brutgebiet von Eisfischen kam zum Vorschein, endlos reihte sich Nest an Nest, die meisten davon von einem Fisch bewacht.

Jonahs Eisfisch (*Neopagetopsis ionah*), wie die hier ansässige Spezies heißt, gehört zur Familie der Krokodileisfische aus der weiteren Verwandtschaft der Barsche und stellt zumindest während ihrer Fortpflanzungszeit einen wesentlichen Bestandteil der antarktischen marinen Biomasse, obwohl jedes einzelne Tier gerade einmal die Größe einer ausgewachsenen Bachforelle erreicht. Dass der Eisfisch wie andere Barsche Brutpflege betreibt, war bekannt. Dafür baut er kreisrunde, etwa 15 Zentimeter tiefe Nestmulden mit einem Durchmesser von 75 Zentimetern. Aufsehen erregend erscheint hier allerdings die Häufung: Mit der Kamera konnten die Forscher mehr als 16 000 Nestmulden

**MASSENHOCHZEIT** Eine riesige Kolonie von Fischnestern, jeweils bewacht von einem Eisfisch, liegt am Grund des Weddellmeers in der Antarktis.

direkt inspizieren. Eine systematische Kartierung des Areals lässt auf eine Gesamtausdehnung von mindestens 240 Quadratkilometern schließen – der vierfachen Fläche des Starnberger Sees. Bei einem Nestterritorium von durchschnittlich vier Quadratmetern ergibt sich hochgerechnet auf das gesamte Areal eine Anzahl von 60 Millionen Nestern mit einer Biomasse der Fischkolonie von mehr als 60 000 Tonnen. Mit diesen eindrucksvollen Werten dürfen die Expeditionsteilnehmer einen Weltrekord verbuchen: Es handelt sich um die größte zusammenhängende Brutkolonie von Fischen, die jemals bislang entdeckt wurde.

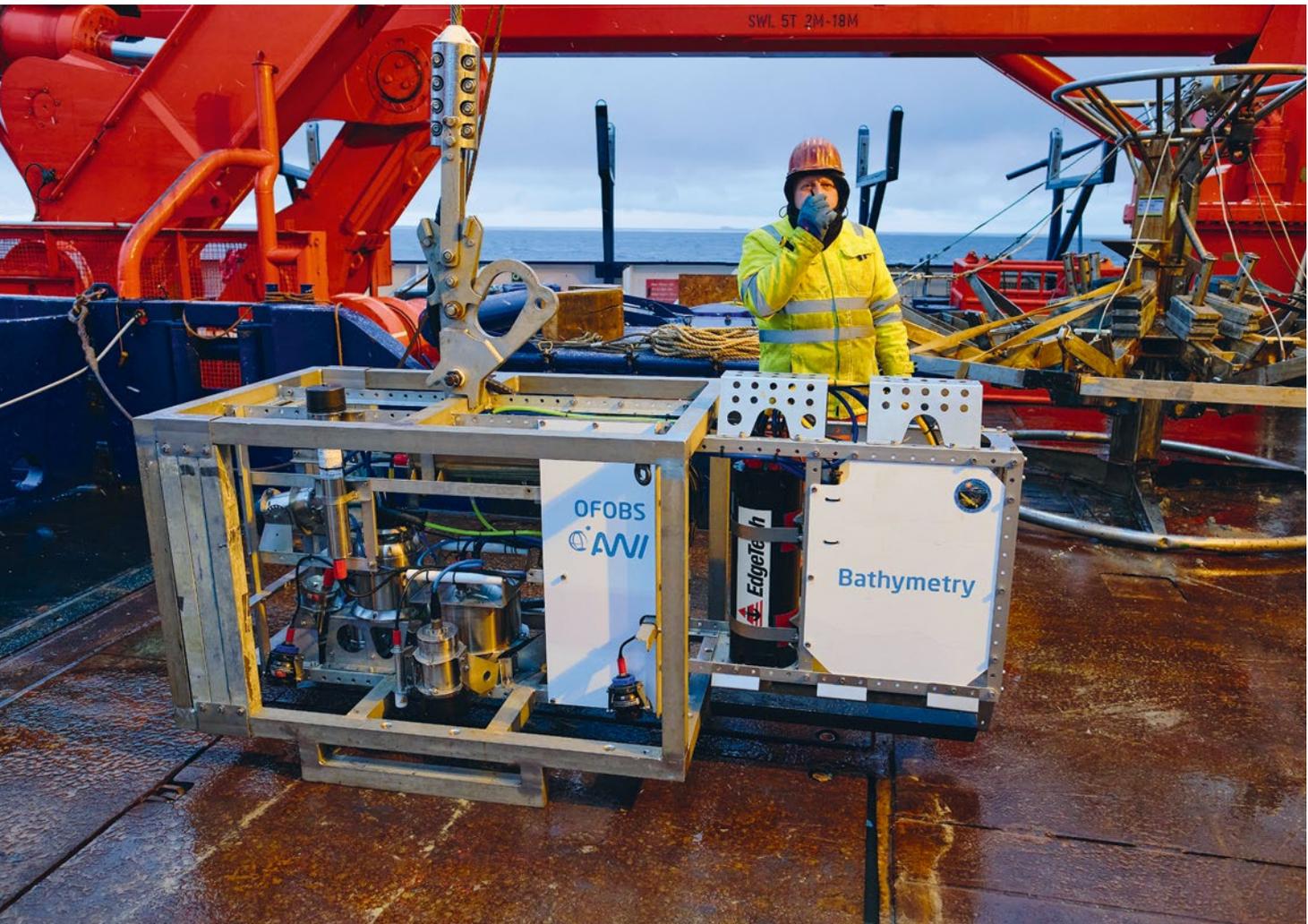
### Sorgfältige Baumeister

Die Forscher beließen es nicht bei dem Zufallsfund, sondern nutzten die Gelegenheit, einen genaueren Blick auf das Brutpflegeverhalten des Eisfisches zu werfen. So monoton die einheitlich geformten Nestmulden wirkten, so sorgfältig scheinen ihre Baumeister den Untergrund vorzubereiten, damit die Eier gegen Abdriften geschützt, aber dennoch im Bereich der Sauerstoff spendenden Strömung lagern. Die Nestmulden sind frei von groben Steinen und abgesunkenen Schwebstoffen. Ihr Grund ist mit Kies bedeckt, so dass die Eier rundum vom Wasser umspült werden und nicht im Sand versinken. Leichte Schwimmbewegungen des wachenden Fisches könnten für zusätzliches frisches Wasser sorgen. Auch für die auffällig monotone und spärliche Besiedlung des Areals mit Wirbellosen wie Seesternen, Schlangensterne oder Asselspinnen machen die Wissenschaftler die Wächterfische verantwortlich, die das Gelege vor Räufern schützen. Zu diesen gehören beispiels-

weise Rochen, die nach den Aufzeichnungen der Unterwasserkamera gelegentlich die Nester aufsuchen. Außerhalb der Kolonie und im Umfeld verlassener Nestmulden erscheint die Artenvielfalt dagegen wesentlich größer.

Die Entdeckung, dass sich so viele Eisfische auf engstem Raum zur Brutpflege zusammendrängen, überrascht im Hinblick auf ihre räuberische Lebensweise, treten doch Raubfische wie unser heimischer Hecht eher als Einzelgänger auf. Weiterhin bemerkenswert erscheint das abrupte Ende der Brutkolonie an ihren Außengrenzen, ohne dass die Dichte der Nester zum Rand hin signifikant abnimmt. Und nicht weit von der aktiv genutzten Kolonie, in der etwa drei Viertel der Gelege mit jeweils 1500 bis 2500 Eiern von je einem Fisch bewacht wurde, spürte die Kamera zusätzliche Areale mit verlassenen Nestmulden auf, die ähnlich dicht beieinanderlagen. Die Eisfische verteilen demnach ihre Gelege nicht wahllos auf dem Meeresboden, sondern suchen gemeinschaftlich bestimmte Orte auf.

Durch die von den Messgeräten des Beobachtungsschlittens übermittelten Daten konnten die Wissenschaftler die vor Ort herrschenden Umweltbedingungen analysieren. So enthielt das Wasser im Brutgebiet mit einer Luftsättigung von 65 bis 75 Prozent etwas weniger Sauerstoff als die umgebenden arktischen Gewässer, dafür lag die Temperatur etwa zwei Grad höher als das bis zu minus zwei Grad Celsius kalte Umgebungswasser. Vermutlich steigt an den Brutkolonien wärmeres, mit Nährstoffen angereichertes Tiefenwasser auf und bietet somit beste Voraussetzungen für ein vielfältiges Nahrungsnetz, von dem die frisch



TIM KATZELANG

## **KUNDSCHAFTER** Mit dem Beobachtungsschlitten OFOBS lässt sich der Meeresboden zentimetergenau untersuchen.

geschlüpften Fischlarven leben können. Andererseits lockt der Eisfisch selbst Fressfeinde an: Weddellrobben tauchen hier bevorzugt auf Beutejagd, wie sich mit besonderen Tieren nachweisen ließ.

Rätselhaft bleibt, wieso die Eisfische die früheren Brutkolonien mit den jetzt leeren Nestern aufgegeben haben. Aber auch hier prägt der Fisch langfristig die Lebensgemeinschaft: Das Aufwirbeln abgesunkener Schwebstoffe beim Nestbau beschleunigt nach Ansicht der Forscher deren Abbau durch Mikroorganismen und setzt damit Nährstoffe frei. Eine erhöh-

te Sterblichkeit der nach der Eiablage entkräfteten Weibchen zeigt ebenfalls Wirkung: Innerhalb der aktiven sowie der verlassenen Brutkolonien liegen auffällig viele Fischkadaver am Boden, die Mikroorganismen und wirbellosen Tieren günstige Lebensbedingungen bieten. Entsprechend hoch ist die Artenvielfalt innerhalb der aufgegebenen Kolonien, in denen sich unter anderem Röhrenwürmer, Moostierchen, Seeanemonen und Schwämme ansiedeln.

Dass die Eisfische so lange im Verborgenen laichen konnten, verdanken sie vermutlich dem dichten Packeis des Weddellmeers, das nur mit Eisbrechern befahrbar ist. Das erschwert wissenschaftliche Beobachtungen genauso wie Erkundungsfahrten der Fischfangindustrie. Die außergewöhnliche Lebensgemein-

schaft gilt in jedem Fall als schützenswert. Daher setzt sich auch die Leiterin des Alfred-Wegener-Instituts, Antje Boëtius, dafür ein, mit Hilfe der internationalen Kommission zur Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR) großflächige Meeresschutzgebiete einzurichten, die den Lebensraum Antarktis vor der wirtschaftlichen Ausbeutung bewahren.

**Annette Hille-Rehfeld** ist habilitierte Biologin, Wissenschaftsjournalistin und Autorin in Stuttgart.

## QUELLE

**Purser, A. et al.:** A vast icefish breeding colony discovered in the Antarctic. *Current Biology* 10.1016/j.cub.2021.12.022, 2022

# MATHEMATIK KI STATT BAUCHGEFÜHL

**Nun nutzt auch die Mathematik die computergestützte Mustererkennung: In der Knotentheorie sowie beim Studium von Symmetrien haben Algorithmen neue Zusammenhänge offengelegt.**

Es gibt kaum einen wissenschaftlichen Bereich, in dem nicht inzwischen künstliche Intelligenz (KI) eingesetzt wird. Doch wie die Philosophie galt die Mathematik bisher als Gebiet, in dem menschliche Fähigkeiten unersetzlich sind: Für neue Erkenntnisse braucht man Kreativität, wie auch beim Führen von Beweisen. Wenn es hingegen um aufwändige Detailarbeit geht, etwa um zahlreiche Fallbeispiele durchzugehen, sind die maschinellen Helfer schon seit Jahrzehnten gefragt. Ebenso hat es sich inzwischen bewährt, Computerprogramme hinzuzuziehen, die Beweise Schritt für Schritt durchleuchten und auf mögliche Fehler hin überprüfen.

Forscher von DeepMind, deren Algorithmus AlphaFold kürzlich für Furore sorgte, weil er erfolgreich Proteinstrukturen vorhersagt, sind nun unter der Leitung von Alex Davies einen Schritt weitergegangen: Zusammen mit dem Mathematiker Geordie Williamson von der University of Sydney und seinem Team haben sie die mächtige KI genutzt, um Hinweise auf bisher unbekannte mathematische Zusammenhänge offenzulegen.

Besonders überraschend für die Fachleute: Eines der Ergebnisse stammt aus der Knotentheorie, einem populären Gebiet der Topologie. »Es ist erstaunlich, dass man eine so einfache wenn auch tief gehende Verbindung in einem Bereich, der bereits umfassend erforscht wurde, bisher übersehen hat«, schreiben die Autoren in ihrem im Dezember 2021 erschienenen Fachaufsatz.

Bis dahin lag dieser, der Intuition folgende Teil des mathematischen Arbeitens meist in menschlicher Hand. »Nur mit einer Kombination aus strengem Formalismus und Bauchgefühl

kann man komplexe mathematische Probleme angehen«, schrieb der Fields-Medaillen-Preisträger Terence Tao 2016 in seinem Blog. Für gewöhnlich fällt Wissenschaftlern ein bestimmtes Muster auf, wodurch sie eine Vermutung äußern, etwa: Die Größen  $X$  und  $Y$  hängen durch eine Formel  $f$  zusammen. Um sich Gewissheit zu verschaffen, gehen sie viele verschiedene Beispiele für  $X$  und  $Y$  durch und testen, ob der entdeckte Zusammenhang auch für sie erfüllt ist. Wenn das der Fall ist, sucht man nach einer Erklärung und beweist die Hypothese.

## **KI lässt den Knoten platzen**

Bekanntlich sind die Methoden des maschinellen Lernens bestens dafür geeignet, Muster zu erkennen, die Menschen eventuell übersehen. Damit sie allerdings funktionieren, braucht man zahlreiche Beispieldaten – zehntausende, wenn nicht gar hunderttausende. Deshalb eignet sich nicht jeder Zweig der Mathematik für eine KI-gestützte Untersuchung. Doch die Knotentheorie und die Darstellungstheorie scheinen wie dafür geschaffen: Erstere enthält etliche verschiedene Knotentypen, während der zweite Bereich symmetrische Strukturen endlicher Objektsammlungen untersucht, von denen es ebenfalls zahlreiche gibt.

In beiden Gebieten existieren jeweils schwammige Vermutungen, dass gewisse Größen miteinander zusammenhängen könnten. Aber von einer klaren Formulierung einer solchen Verbindung, geschweige denn einem Beweis, war man noch weit entfernt. Daher entwickelten Williamson und sein Team zusammen mit den Forschern von DeepMind die Idee, Computer die Feinheiten herausfinden zu lassen. Man würde etliche Bei-

spieldaten generieren, damit eine KI nach wiederkehrenden Mustern sucht. Anschließend könnte man einen zweiten Algorithmus nutzen, der herausarbeitet, welche Eigenschaften innerhalb der Daten für die festgestellte Verbindung verantwortlich sind. Damit ließe sich eine saubere Hypothese formulieren, die es dann zu beweisen gilt. Der letzte Schritt bleibt allerdings den Forschern überlassen.

Zunächst wandten sich die Wissenschaftler der Knotentheorie zu. Mathematikerinnen und Mathematiker versuchen schon seit Jahrhunderten, eine Methode zu finden, um alle möglichen Arten von Knoten zu kategorisieren. Dafür muss man wissen, dass sich mathematische Knoten von jenen unterscheiden, die uns im Alltag begegnen, denn sie dürfen keine losen Enden haben. Schnürsenkel, Seile fürs Klettern oder Tauen für die Schifffahrt eignen sich also nicht für eine knotentheoretische Untersuchung. Stattdessen stellt man sich vor, die losen Enden seien miteinander verklebt, wodurch eine Schleife entsteht, die einen Knoten beherbergen kann.

Die wichtigste Kernfrage des Bereichs lautet: Wie findet man heraus, ob zwei Knoten gleich sind? Denn je nachdem, wie man sie grafisch abbildet, kann ein und derselbe Knoten sehr unterschiedliche Formen annehmen. Diese so einfach anmutende Frage hat ein eigenständiges Fachgebiet hervorgebracht, das extrem komplizierte und abstrakte Konzepte enthält. Vereinfacht ausgedrückt, versucht man in der Knotentheorie bestimmte Eigenschaften zu identifizieren, anhand derer sich Knoten besser einteilen lassen.

Das macht man meist, indem man ihnen so genannte Invarianten zuordnet: charakteristische Zahlen oder Polynome, die sich nicht verändern, wenn man eine andere Darstellung des Knotens wählt. Leider gibt es keine Invariante, die jeden Knoten eindeutig kennzeichnet (zwei unterschiedliche Knoten können die gleiche Invariante haben). Inzwischen haben Knotentheoriker verschiedenste Arten von Invarianten definiert. Diese lassen sich meist in zwei Kategorien teilen.

Auf der einen Seite gibt es algebraische Invarianten, etwa Alexander-Polynome, Conway-Polynome oder Jones-Polynome sowie die ganzzahlige »Signatur«, die jeweils von der Form und weiteren Eigenschaften eines Knotens abhängen. Auf der anderen Seite existieren geometrische Invarianten, für die man etwas tiefer in die Materie eintauchen muss: Sie untersuchen nicht bloß die Gestalt des Knotens, sondern widmen sich ebenfalls seiner Umgebung.

Anstatt sich aber auf den gewöhnlichen dreidimensionalen Raum zu konzentrieren, betrachten Mathematiker die Objekte meist in dem dreidimensionalen Analogon einer Kugelfläche, der so genannten 3-Sphäre. Diese erweist sich durch ihre besonderen Eigenschaften als umgänglicher – auch wenn sie unser Vorstellungsvermögen übersteigt. Jedenfalls liefert die geometrische Sichtweise zahlreiche Invarianten, etwa das Volumen der 3-Sphäre, wenn man den Knoten daraus herausschneidet.

Schon länger vermuten Fachleute, dass es eine Verbindung zwischen algebraischen und geometrischen Invarianten gibt. Doch wie sie genau aussehen könnte, war bisher unklar. Williamson und seine Kollegen glauben, man könne aus einigen geometrischen Eigenschaften auf die ganzzahlige algebraische Signatur eines Knotens schließen. Um das zu beweisen, erzeugten die Forscher zunächst einen umfangreichen Datensatz: Für zehntausende Knoten berechneten sie verschiedene dazugehörige Invarianten. Mit einem Teil dieser Daten trainierten sie ein neuronales Netz. Sie übergaben dem Algorithmus zu unter-

schiedlichen Knoten jeweils eine geometrische Invariante und die entsprechende Signatur. Aufgabe der KI war es, eine Funktion zu finden, die beide Größen aufeinander abbildet.

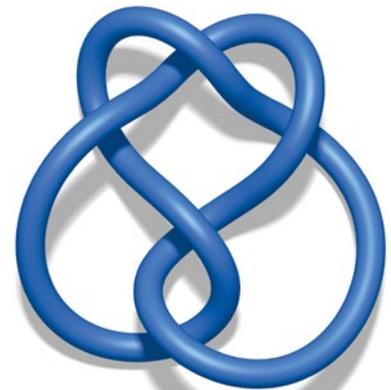
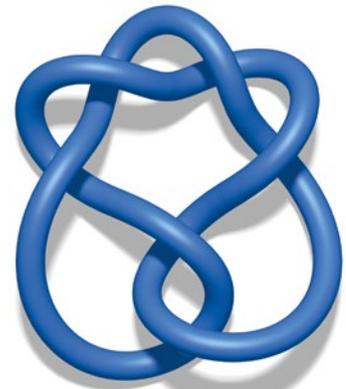
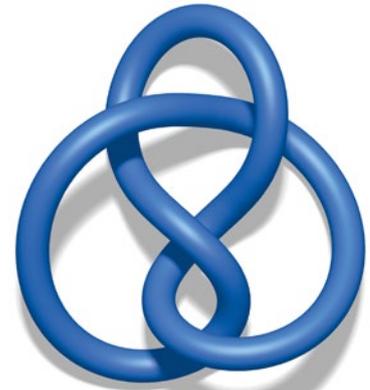
Nach dem Training konfrontierten die Forscher das Netzwerk mit neuen Daten: geometrische Invarianten von noch nicht behandelten Knoten. Nun musste die Software daraus eine Signatur berechnen, was in 78 Prozent der Fälle gelang. Damit hatten die Mathematiker deutliche Hinweise darauf, dass die KI einen Zusammenhang zwischen beiden Bereichen gefunden hatte. Um die vermutete Verbindung klar auszuformulieren – bestenfalls durch eine Gleichung –, musste man herausfinden, welche der vielen verschiedenen geometrischen Invarianten auf die Signatur schließen lassen.

### Auf der Suche nach Mustern

Dafür griffen die Forscher auf ein zweites Computerprogramm zurück. Dieses untersucht, wie sehr das Ergebnis (die Signatur) von gewissen Parametern (geometrischen Invarianten) abhängt. Was passiert beispielsweise, wenn man den Wert einer bestimmten Invariante ändert und das neuronale Netz daraufhin die Signatur berechnen lässt? Wie sich herausstellte, gab es drei maßgebliche Größen, von denen das Ergebnis abhing. Die restlichen geometrischen Eigenschaften hatten kaum eine Auswirkung auf die berechnete Signatur eines Knotens. Um sich abzusichern, zogen Davies und seine Kollegen erneut das ursprüngliche neuronale Netz heran und trainierten es darauf, nur die drei relevanten geometrischen Invarianten zu berücksichtigen, um die Signatur zu berechnen. Das Programm schnitt dabei genauso gut ab wie zuvor.

Damit konnten Williamson und sein Team die lange gesuchte Beziehung in einer griffigen Formel darstellen: Auf der linken Seite der Gleichung finden sich die drei abstrakten geometrischen Invarianten, die geeignet kombiniert auf der rechten Seite die algebraische Signatur liefern. Ein so einfaches und weit reichendes Ergebnis hatte niemand erwartet.

z: Knoten



OBER: COMMONS WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:FILE:FOUR-EIGHT\_KNOT.PNG; MITTE: COMMONS WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:FILE:SEVEN-FIVE\_KNOT.PNG; UNTER: COMMONS WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:FILE:\_THREE-TWO\_KNOT.PNG / PUBLIC DOMAIN

**KNOTEN KATEGORISIEREN** Um Knoten zu beschreiben, greifen Fachleute auf Invarianten zurück: Das sind Größen, die sich nicht ändern, wenn man die Gestalt des Knotens wandelt, ihn etwa dreht oder spiegelt.

$X(z)$ : Geometrische Invarianten				$Y(z)$ : Algebraische Invarianten		
Volumen	Chern-Simons	meridiale Translation	...	Signatur	Jones-Polynom	...
2,0299	0	$i$	...	0	$t^{-2} - t^{-1} + 1 - t + t^2$	...
2,8281	-0,1532	$0,7381 + 0,8831i$	...	-2	$t - t^2 + 2t^3 - t^4 + t^5 - t^6$	...
3,1640	0,1560	$-0,7237 + 1,0160i$	...	0	$t^{-2} - t^{-1} + 2 - 2t + t^2 - t^3 + t^4$	...

Nach diesem Erfolg wandten sich die Wissenschaftler einem zweiten mathematischen Bereich zu, der sich dank großer Datenmengen ebenfalls für KI-gestützte Methoden eignet. Hierbei geht es um die Symmetrien endlich vieler unterschiedlicher Objekte; man untersucht also, wie sich  $n$  Elemente umordnen lassen. Betrachtet man etwa die Ziffern 0, 1, 2 und 3, gibt es 24 verschiedene Anordnungen (1023, 1203 und so weiter). Solche Permutationen kann man auf verschiedenste Weisen mathematisch ausdrücken, unter anderem durch Matrizen. Genau damit beschäftigt sich die Darstellungstheorie. Eine wichtige Aufgabe des Fachs besteht darin, »irreduzible« Darstellungen zu finden, die sich

**POLYNOME UND GRAPHEN** Mit diesen beiden mathematischen Strukturen lassen sich Symmetrien in verschiedenen Anordnungen von Objekten beschreiben.

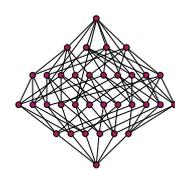
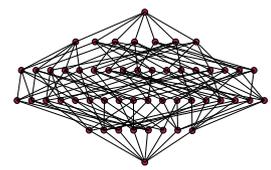
nicht in einfachere Bestandteile zerlegen lassen. Kennt man diese Darstellungen, verrät das bereits viel über die symmetrischen Eigenschaften der untersuchten Objekte.

**Ordnung in Umordnungen schaffen**

Wie David Kazhdan und George Lusztig 1979 herausfanden, lassen sich die irreduziblen Darstellungen mittels nach ihnen benannter KL-Polynome bestimmen. Wenn man zwei Elemente betrachtet, etwa 0123 und 1023, kann man ihnen ein eindeutiges Polynom zuordnen. Doch es gibt noch eine zweite Größe aus einem völlig anderen Bereich, die man mit zwei Elementen verbindet: so genannte Bruhat-Graphen. Dabei handelt es sich um komplizierte Netzwerke, die eine gewisse Ordnung in den Symmetrien schaffen. Seit über 40 Jahren vermuten Mathematiker, dass Letztere direkt mit KL-Polynomen zusammenhängen, aber sie wussten nicht, wie.

Eines der Hauptprobleme ist, dass die Graphen aus extrem vielen Punkten und noch mehr Kanten zwischen ihnen bestehen. Diese komplexe Struktur schien eine griffige Verbindung zu den vergleichsweise simplen Polynomen (etwa  $1 + 2q + q^2$ ) auszuschließen. Glücklicherweise können KI-Programme gut mit komplizierten Netzwerken umgehen: Die Forscher um Davies übergaben dem Algorithmus zahlreiche Bruhat-Graphen und dazugehörige KL-Polynome, um ein Muster zu finden. Wie in der Knotentheorie konfrontieren sie die trainierte KI anschließend mit unbekanntem Bruhat-Graphen, für die das Programm häufig die richtigen Polynome vorherzusagen konnte. Offenbar gibt es also einen Zusammenhang zwischen den beiden so unterschiedlichen Objekten.

Um das Problem zu vereinfachen, setzten Davies und sein Team dann einen zweiten Algorithmus ein, der bestimmen sollte, welche Knoten im Bruhat-Graphen besonders wichtig bei

$z$ : Paare von Permutationen	$X(z)$ : Bruhat-Graphen	$Y(z)$ : KL-Polynom
(03214), (34201)		$1 + q^2$
(021435), (240513)		$1 + 2q + q^2$

der Berechnung der KL-Polynome sind. Wie sich herausstellte, muss man gar nicht das vollständige Netzwerk beachten, sondern kann sich einem Ausschnitt widmen, um daraus die gesuchten Polynome abzuleiten. Die Forscher entdeckten, dass sich ein Bereich der komplizierten Struktur in zwei Teile zerlegen lässt, wobei eines davon einem hochdimensionalen Würfel entspricht, einem so genannten Hyperwürfel. Eine griffige Formel könnte aus diesen Teilgraphen die

KL-Polynome liefern, bisher gelang es Williamson und seinen Kollegen aber nicht, sie zu beweisen. Immerhin haben Darstellungstheoretiker damit nach 40 Jahren nun endlich einen viel versprechenden Ansatz, auf dem sie aufbauen können.

KI-Algorithmen haben demnach in den kreativen mathematischen Prozess Einzug erhalten – und zwar mit ihrer größten Stärke: der Erkennung von Mustern. Die beteiligten Forscher sind sich sicher, dass ihre Ergebnisse

keine Ausnahme bleiben. Sie hoffen, ihre Erfolge werden weitere Kollegen dazu motivieren, Methoden des maschinellen Lernens in ihre Prozesse zu integrieren.

**Manon Bischoff** ist Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

## QUELLE

**Davies, A. et al.:** Advancing mathematics by guiding human intuition with AI. Nature 600, 2021

## EVOLUTION VON SCHWÄMMEN LERNEN

**Untersuchungen an einfach aufgebauten Tieren liefern Hinweise darauf, wie das Nervensystem entstanden ist.**

Ein wesentliches Merkmal der Tiere – besonders im Vergleich zu Pflanzen oder Pilzen – ist ihre Fähigkeit, sich aus eigenem Antrieb zu bewegen. Dazu dienen ihnen zumeist die Muskeln als Motoren und das Nervensystem als Steuerzentrale. Wie bedeutsam ein eigenständiges Fortkommen ist, wird ersichtlich, wenn man jene Ausnahmen unter den Tieren betrachtet, die weder Muskeln noch Nerven besitzen. Zu diesen zählen die urtümlichen Schwämme (Porifera), die sich nur äußerst langsam bewegen können und ursprünglich für Pflanzen gehalten wurden. Ihre Vorfahren haben sich vor ungefähr 580 Millionen Jahren von den anderen Tieren abgespalten. Damals gab es weder Muskulatur noch Nervensysteme, und die Schwämme haben es bis heute dabei belassen – anders als fast alle übrigen Tiere.

Schwämme sind sehr einfach gebaut. Sie saugen Wasser ein, filtern Nahrungspartikel (meist Bakterien) heraus und geben es wieder ab. Die Kraft, die den Vorgang antreibt, geht von so genannten Kragengeißelzellen aus. Diese besitzen ein hin und her schlagendes langes Cilium, die Geißel, die das Wasser durch einen »Kragen«

aus kreisförmig angeordneten Zellfortsätzen treibt, der wie ein Filter wirkt. Im Inneren des Tiers ordnen sich die Kragengeißelzellen um kleine Kammern herum an und erzeugen mit ihrem Geißelschlag eine Strömung durch das Tier. Epithelzellen bilden Röhren, die zu den Kammern hin- und von ihnen wegführen und den Wasserstrom kanalisieren. Darüber hinaus besitzen Schwämme noch Zellen, die im Inneren des Organismus umherschweifen und verschiedene Funktionen ausüben, etwa lange Skelettnadeln zu bilden.

Angesichts dieser simplen Struktur und der kaum merklichen Fortbewegung sorgte es vor einigen Jahren für große Überraschung, dass Schwämme viele Gene besitzen, die für Moleküle des Nervensystems kodieren. Hierzu zählen Erbanlagen mit dem Bauplan für wichtige Proteine der Synapse – der Verbindungsstelle zwischen Nervenzellen und einem Schlüsselement der neuronalen Reizleitung. Die Tiere stellen also Moleküle her, die helfen, synaptische Botenstoffe freizusetzen und zu empfangen und die damit verbundenen Signale weiterzugeben. Und das, obwohl sie überhaupt keine Synapsen

besitzen! Was machen sie mit diesen Proteinen? Als wir nach Antworten darauf suchten, gewannen wir wichtige Erkenntnisse zum Ursprung des Nervensystems.

### Zelle für Zelle untersucht

Bis vor Kurzem wäre es nahezu unmöglich gewesen, solchen Fragen nachzugehen. Erst einige umwälzende technische Neuerungen haben es unserer Arbeitsgruppe am EMBL in Heidelberg ermöglicht, zu erforschen, wo im Schwammkörper die synaptischen Gene abgelesen und die zugehörigen Proteine hergestellt werden. Die so genannte Einzelzellsequenzierung erlaubt uns, für alle Zellen eines Schwamms gleichzeitig zu ermitteln, welche Gene darin jeweils aktiv sind. Herausfinden lässt sich das, indem man sämtliche Transkripte (RNA-Abschriften des Erbguts) einer Zelle isoliert und ihre Sequenzen entziffert. Macht man das mit ausreichend vielen Zellen eines Schwamms, kann man sie in verschiedene Genexpressionstypen einteilen. Wir haben das für den Süßwasserschwamm *Spongilla lacustris* getan und so aufgedeckt, welche seiner Zelltypen die synaptischen Gene ablesen. Aller-

dings wussten wir damit noch nicht, wo im Schwammkörper diese Zellen sitzen, denn das Tier wurde für den Versuch in seine Einzelbestandteile aufgelöst, womit deren räumliche Koordinaten verloren waren.

Hier half uns eine zweite technische Innovation. Wir schafften es, bestimmte RNA-Abschriften in Zellen des intakten Schwammkörpers gezielt nachzuweisen, indem wir ein neuartiges Verfahren der »In-situ-Hybridisierung« (Erbgut-Untersuchung direkt an Zellen oder Geweben) auf *S. lacustris* übertrugen. Für jeden Zelltyp des Schwamms wählten wir ein oder mehrere Gene aus, deren RNA-Abschriften – laut vorheriger Einzelzellsequenzierung – charakteristisch für ihn sind, und klärten dann mittels In-situ-Hybridisierung dieser RNA-Moleküle, wo im Schwammkörper der entsprechende Zelltyp zu finden ist. Das Ergebnis war eine »Landkarte« des lebenden Tiers, in der sämtliche Zellarten samt ihrem molekularen Inventar verzeichnet sind. Jetzt mussten wir nur noch nachsehen, wo genau die synaptischen Proteine hergestellt werden.

Zunächst suchten wir nach typischen Molekülen der so genannten Präsynapse – jenes Teils einer synaptischen Verbindung, in dem die vorgeschaltete Zelle den Botenstoff produziert und in den synaptischen Spalt ausschüttet. Hier wurden wir gleich mehrfach fündig, unter anderem in den Epithelzellen, welche die bereits erwähnten zu- und ableitenden Röhren bilden. Das überraschte uns nicht,

denn schon frühere Studien hatten gezeigt, dass diese Kanäle wellenartig kontrahieren und daran Signalsubstanzen mitwirken, die in den Nervensystemen anderer Tiere als Botenstoffe aktiv sind – etwa Glutamat und Gamma-Aminobuttersäure (GABA). Auch Stickstoffmonoxid scheint bei der Kommunikation zwischen Epithelzellen eine Rolle zu spielen.

Vollkommen unerwartet hingegen war ein zweiter Ort erkennbar, an dem

präsynaptische Gene aktiv sind: In wandernden Gewebezellen nämlich, die sich in den Kragengeißelkammern aufhalten. Als besonderes Merkmal besitzen sie lange Fortsätze, die sie in alle Richtungen ausstrecken und mit denen sie die umgebenden Kragengeißelzellen zu berühren scheinen. Das hatte den Entdecker dieser Gewebezellen, den französischen Zoologen Pavans de Ceccatty, in den 1950er Jahren dazu veranlasst, sie als »neu-



## KONTAKTAUFNAHME

**Oben:** Im Inneren von Schwämmen ordnen sich Kragengeißelzellen (grau) um kleine Kammern herum an. Dazwischen sind neuroide Zellen (orange) anzutreffen. **Unten:** Die neuroiden Zellen berühren die Kragengeißelzellen (lila) und kommunizieren mit ihnen über synaptische Proteine.



roid«, also nervenzellähnlich, zu bezeichnen. Vor diesem Hintergrund stach uns die Tatsache besonders ins Auge, dass sie präsynaptische Gene ablesen.

Eine weitere Entdeckung erhöhte noch unser Interesse. Als wir ermittelten, wo im Tier die postsynaptischen Gene aktiv sind – also die mit den Bauplänen für den nachgeschalteten Teil der Synapse – wurden wir in den Kragengeißelzellen fündig. Das sind exakt jene, mit denen die neuroiden Zellen samt ihrer präsynaptischen Bestandteile vermittelt ihrer langen Fortsätze in Kontakt treten.

Eine genauere Untersuchung beider Zelltypen und ihrer Interaktionen drängte sich geradezu auf. Dafür schien die Elektronenmikroskopie mit ihrer hohen räumlichen Auflösung geeignet. Doch wie sollten wir in einem Schwamm, der an zellulären Dimensionen gemessen riesig ist, ein

## Sind Darm und Körperwand die Ursprungs-orte des Nervensystems?

Gespans aus Kragengeißel- und neuroider Zelle finden? Das war die Suche nach der sprichwörtlichen Nadel im Heuhaufen.

Hier half uns eine dritte technische Innovation: die serielle Elektronenmikroskopie. Sie erlaubt es, ganze Gewebelöcher elektronenmikroskopisch in hoher Auflösung zu erfassen, um große Volumina auf bestimmte Strukturen hin zu durchforsten. Zusätzlich dazu haben Kollegen am EMBL um Yannick Schwab eine Methode entwickelt, die zunächst Licht- und Röntgenmikroskopie einsetzt, um einzelne Zellen zu orten und dann mittels

serieller Elektronenmikroskopie eine hochauflösende 3-D-Abbildung des entsprechenden Areals zu erzeugen. Damit gelang es uns, neuroide Zellen in Kragengeißelkammern aufzuspüren und ihre Kontaktaufnahme zu Kragengeißelzellen genauer zu analysieren.

### Molekulare Botschaften

Wir fanden eindeutige Belege für zelluläre Kommunikation: Die Fortsätze der neuroiden Zellen umwickeln die stabförmigen Auswüchse der Kragengeißelzellen, als ob sie sich daran festhielten. Sie bilden außerdem eine Einstülpung um die Spitze der Geißel herum. Die Geißel wirkt an den Kontaktstellen wie abgeknickt, was auf eine Unterbrechung des Geißelschlags hinweist. Zudem enthalten die Fortsätze der neuroiden Zellen zahlreiche sekretorische Vesikel, also blasenförmige Gebilde, mit deren Hilfe sie Substanzen ausschütten können. Diese Vesikel gehen aus dem Golgi-Apparat hervor, der an der Sekretbildung mitwirkt – genau so, wie man es für eine präsynaptische Zelle erwarten würde.

Was können wir aus diesen Erkenntnissen ableiten? Prä- und postsynaptische Proteine dienen in den Schwämmen, die wir untersucht haben, offenbar der Kommunikation zwischen umherschweifenden neuroiden Zellen und Kragengeißelzellen. Diese Verständigung könnte es ermöglichen, den Geißelschlag der Zellen zu steuern, um beispielsweise die Kragengeißelkammern vorübergehend stillzulegen, wenn diese gereinigt werden müssen. Dafür spricht, dass die umherschweifenden Zellen mitunter Bakterien und weitere Fremdkörper vertilgen. Zudem scheinen die präsynaptischen Proteine für den Informationsaustausch zwischen den Epithelzellen der Kanalwände wichtig zu sein. Diese Zellen sorgen dafür, dass sich die zu- und ableitenden Kanäle öffnen und schließen, was den Wasserstrom reguliert und der Nahrungsaufnahme dient.

Wir haben also in einem Tier, das kein Nervensystem besitzt, Gewebestrukturen entdeckt, in denen Zellen über prä- und postsynaptische Protei-

ne miteinander kommunizieren. Was haben diese Strukturen mit den Nervensystemen von anderen Tieren zu tun? Und verrät uns das etwas über den evolutionären Ursprung neuronaler Netzwerke? Auch hierzu liefern unsere Arbeiten einige Antworten. Laut den Ergebnissen der Einzelzellsequenzierung ähneln die Kragengeißelzellen des Schwamms den Darmzellen anderer Tiere. Für sich genommen verwundert das nicht, da beide mit Nahrungsaufnahme und Verdauung zu tun haben. Im Kontext der übrigen Erkenntnisse bedeutet es aber: Zumindest Teile des Nervensystems könnten im Zusammenhang mit der Evolution des Darms entstanden sein.

Tatsächlich verfügt der Darm vieler Tiere – auch des Menschen – über ein eigenes großes, so genanntes enterisches Nervensystem. Es besitzt beim Menschen rund fünfmal so viele Neurone wie das Rückenmark. Es wird eine sehr spannende Aufgabe sein, deren Verhältnis zu den übrigen Nervenzellen des Körpers eingehend zu erforschen. Darüber hinaus gleichen die zu- und ableitenden Kanäle der Kragengeißelkammern der äußeren Körperwand anderer Tiere, wo ebenfalls zahlreiche Neurone sitzen. Es könnte sich somit andeuten, dass die Zellen heutiger Nervensysteme zwei Ursprünge haben: im Darm und in der äußeren Körperwand. Eine faszinierende Hypothese, der wir weiter nachgehen werden.

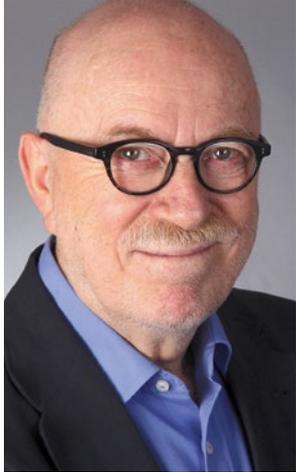
**Detlev Arendt** ist Entwicklungsbiologe. Am Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) leitet er eine Forschungsgruppe, die sich mit der Evolution des Nervensystems der Bilateria befasst.

### QUELLEN

**Arendt, D.:** Elementary nervous systems. *Philosophical Transaction of the Royal Society B* 10.1098/rstb.2020.0347, 2021

**Arendt, D.:** The evolutionary assembly of neuronal machinery. *Current Biology* 10.1016/j.cub.2020.04.008, 2020

**Musser, J.M. et al.:** Profiling cellular diversity in sponges informs animal cell type and nervous system evolution. *Science* 10.1126/science.abj2949, 2021



# SPRINGER'S EINWÜRFE MÄCHTIGE MÄNNCHEN, WILLIGE WEIBCHEN?

**Vor 150 Jahren entdeckte Darwin die sexuelle Selektion. Seine genialen Einsichten stießen an die Grenzen der zeitgenössischen Moral.**

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

» [spektrum.de/artikel/1989091](https://spektrum.de/artikel/1989091)

Im 19. Jahrhundert lag die Erkenntnis quasi in der Luft, dass die Vielfalt der Lebensformen einem geologischen Zeiträume umfassenden Prozess entstammt. So publizierte Charles Darwin seine »Entstehung der Arten«, als Alfred Russel Wallace ihm mit einer praktisch identischen Evolutionslehre zuvorzukommen drohte. Hingegen war Darwins späteres Werk über »Die Abstammung des Menschen und die geschlechtliche Zuchtwahl« absolut originell – und wirkte entsprechend skandalös. Vor allem der Nachweis der biologischen Nähe von Mensch und Affe wurde als tiefe Kränkung unserer Einzigartigkeit empfunden. Viel weniger provokant fand man erstaunlicherweise Darwins Parallelisierung der Sexualität von Tier und Mensch. Warum eigentlich?

In ihren Grundzügen gilt Darwins Theorie der sexuellen Selektion bis heute: Das Männchen signalisiert dem anderen Geschlecht Potenz und gute Fitness, etwa durch Sieg im Duell mit Artgenossen, durch spektakuläre Balztänze oder durch prachtvolle Attribute. Also lässt sich ein gesundes Weibchen herbei, mit dem Auserwählten zu kopulieren, und so pflanzt sich vorteilhaftes Erbgut fort.

Während der anderthalb Jahrhunderte seit Darwin hat dieses »züchtige« Bild tierischen Sexlebens sehr viel mehr Rouge aufgelegt. Aus heutiger Sicht ist der Begründer der Evolutionslehre ein prüdes und misogynisches Kind seiner Zeit gewesen, konstatieren die Biologen Gil G. Rosenthal von der Universität Padua und Michael J. Ryan von der University of Texas in Austin (*Science* 375, eabi6308, 2022).

Darwins Weibchen verhalten sich wie brave Bräute, um welche die männlichen Heiratsanwärter mit Impogniergehebe herumstolzieren, bis die schönste Uniform endlich den Ausschlag gibt. Für Darwin war mit der Partnerwahl die Sache erledigt, wie beim Happy End im viktorianischen Roman: Die beiden kriegen sich.

In Wirklichkeit fangen damit die Probleme erst an. Tatsächlich ist der weibliche Part ein komplizierter interaktiver Prozess, der nicht nur vor, sondern auch während und nach der Begattung stattfindet. Manchmal verfügen die Weibchen über äußerlich unsichtbare Auswahlmechanismen, zum Beispiel Vaginalformen, deren komplizierte Umwege einen nicht passend geformten Penis am Eindringen hindern. Oft müssen die Spermien auf dem Weg zur Eizelle einen eigenen Konkurrenzkampf bestehen, weil das Weibchen kurz hintereinander mit mehreren Männchen kopuliert hat. Und unter afrikanischen Antilopen herrscht durchaus die Sitte, dass mehrere Weibchen im Kampf um ein männliches Prachtstück aggressiv die Hörner kreuzen.

In der viktorianischen Epoche gab es eben noch keinen Kinsey-Report, der – wie die Untersuchung des menschlichen Sexualverhaltens durch Alfred Charles Kinsey um 1950 – Darwins Zeitgenossen über die tatsächliche Vielfalt und Verbreitung aller möglichen sexuellen Praktiken informiert hätte. Deshalb ging es nach damaligem Verständnis auch im Tierreich so ungemein gesittet zu wie in einem biederem Liebesroman. Da gab es weder Homosexualität noch Fetischismus, weder Promiskuität noch Gruppensex, weder Masturbation noch Stimulation der Klitoris.

Wie man heute weiß, ist all das unter Tieren gang und gäbe. Ob Darwin davon eine Ahnung hatte und sich nur hütete, darüber zu schreiben, oder ob er die Spielarten tierischer Sexualität aus Prüderie komplett verdrängte? Das bleibt eine Facette seiner Biografie.

Seither sind die Rollenbilder von Mann und Frau in Bewegung geraten, das soziale Geschlecht (englisch »gender«) emanzipiert sich allmählich vom biologischen (»sex«). Davon bleibt unser Verständnis der sexuellen Selektion ebenfalls nicht unberührt.

# HOMO NALEDI DER FELSKLETTERER

**Angesichts des spärlichen Baumbewuchses, der einst im südlichen Afrika herrschte, überrascht die Existenz eines Homininen, der offensichtlich ans Klettern angepasst war. Doch anscheinend konnte sich *Homo naledi* damit einen anderen, sonst nur schwer zugänglichen Lebensraum erschließen.**



**Jean-Luc Voisin** ist habilitierter Paläoanthropologe an der Forschungseinheit ADES (Anthropologie bio-culturelle, droit, éthique et santé) der Aix-Marseille Université in Frankreich.

» [spektrum.de/artikel/1989094](https://www.spektrum.de/artikel/1989094)

► Im Jahr 2015 durfte die staunende Paläoanthropologenzunft einen außergewöhnlichen Neuzugang in der menschlichen Familie begrüßen: *Homo naledi*. Dieser archaische Gnom, aufgespürt in den Tiefen einer Höhle, scheint die Kletterfähigkeiten der noch wesentlich älteren Australopithecinen beibehalten zu haben. Jedoch handelt es sich eindeutig um einen Menschen, also um einen Angehörigen der Gattung *Homo*, der vor etwa 300 000 Jahren im südlichen, nahezu waldlosen Afrika lebte.

Die Erforschung von *H. naledi*, an der ich als bislang einziger französischer Wissenschaftler teilnehmen durfte, steht noch ganz am Anfang. Es begann für mich Anfang 2014, als ich eine E-Mail von einer Doktorandin der Australian National University in Canberra erhielt: Elen Feuerriegel suchte meinen Rat, was später dazu führte, dass ich in die Prüfungskommission für ihre Doktorarbeit aufgenommen wurde. 2017 – inzwischen hatte sie eine Stelle an der University of Washington in Seattle (USA) angetreten – schlug sie mir dann vor, sie bei ihren Untersuchungen der oberen Gliedmaßen von *H. naledi* zu unterstützen. Die anatomische Analyse der Schulter dieser Spezies, gepaart mit meinen persönlichen Erfahrungen im Klettersport, verleiteten mich schließlich zu einer gewagten Hypothese: War *Homo naledi* ein Kletterspezialist?

Auf den ersten Blick erscheint die Idee wenig plausibel: Die letzten baumbewohnenden Mitglieder der Abstammungslinie des Menschen (Homininen) waren die Australopithecinen, die vor mehr als einer Million Jahre lebten – lan-

## RÄTSELHAFTES MISCHWESEN

Die künstlerische Darstellung der Bildhauerin Élisabeth Daynès zeigt das Antlitz von *Homo naledi*.

Diese menschliche Spezies ähnelte noch Vormenschen wie *Australopithecus*, gehörte aber eindeutig zur Gattung *Homo*.



## AUF EINEN BLICK DOPPELTES TALENT

- 1** 2015 wurde eine neue Menschenart namens *Homo naledi* beschrieben, die vor schätzungsweise 300 000 Jahren im südlichen Afrika lebte.
- 2** Die Fossilien weisen eine eigenartige Mischung anatomischer Merkmale auf. Manche deuten auf einen aufrechten Gang hin, andere passen eher zu einer kletternden Fortbewegung.
- 3** Im Lebensraum von *H. naledi* gab es vermutlich nur wenige Bäume. Möglicherweise nutzte die Spezies ihre Kletterkünste, um sich bei Bedarf auf Klippen oder in Höhlen zurückzuziehen.

ge vor dem Auftreten des *H. naledi*. Aber alles an dieser Spezies, von den Umständen ihrer Entdeckung bis hin zu ihren anatomischen Merkmalen, überrascht und irritiert dermaßen, dass die Menschenart nahezu surreal wirkt. Dennoch existierte sie vor gar nicht allzu langer Zeit.

Die 2015 von Lee Berger von der südafrikanischen University of the Witwatersrand und seinem Team veröffentlichte Beschreibung des *H. naledi* machte weltweit Schlagzeilen; vor allem aber verwirrte sie zutiefst die Urzeitforscher (siehe »Spektrum« November 2015, S. 10). Man kannte bis dahin bereits sechs bis neun *Australopithecus*-Arten (über drei wird bis heute gestritten), drei Spezies der robusten Australopithecinen (Paranthropus) sowie mehr als zehn verschiedene *Homo*-Arten (auch hier ist man sich nicht ganz einig). In diesen hochkomplexen Rahmen reihte sich nun noch *H. naledi* ein und vergrößerte das allgemeine Chaos.

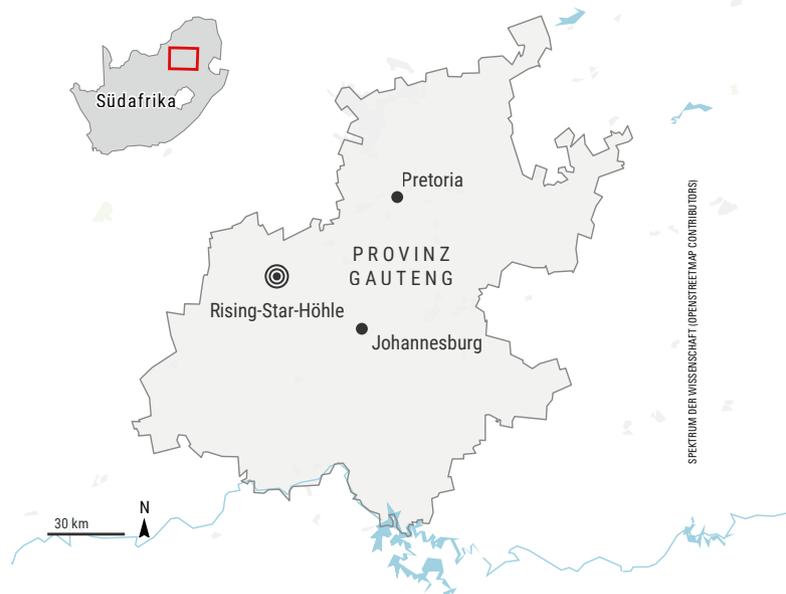
Das Wort »naledi« bedeutet »Stern« auf Sesotho, eine der elf offiziellen Sprachen in Südafrika. Berger wählte den Namen, weil die Knochenstücke von *H. naledi* 2013 im Karsthöhlensystem Rising Star (»Aufsteigender Stern«) der südafrikanischen Provinz Gauteng auftauchten. Der Komplex liegt keine drei Kilometer entfernt von Sterkfontein und knapp 800 Meter von Swartkrans, zwei der wichtigsten Australopithecinen-Fundstätten im südlichen Teil des Kontinents (siehe rechts »Der Fundort Rising Star«).

Mehr als 1550 verschiedene Knochen, darunter 137 einzelne sowie 58 noch im Kiefer steckende Zähne, konnten aus der stockfinsternen Dinaledi-Kammer des Höhlensystems zu Tage gefördert werden. Untereinander unterscheiden sich diese Überbleibsel weniger als von Fossilien anderer menschlicher Spezies, was beweist, dass es sich hier tatsächlich um eine einzige Menschenform handelt. In der Lesedi-Kammer, wo 2013 auf einer kleinen Fläche gegraben wurde, stieß man auf insgesamt 118 Überreste, die zwei Erwachsenen und einem Kleinkind zugeordnet werden. 2021 kamen dann noch Fragmente eines Kinderschädels aus einer benachbarten Höhle hinzu. Die Knochen scheinen innerhalb eines sehr kurzen Zeitintervalls in die Kammern gelangt zu sein und stammen von insgesamt etwa zwei Dutzend verschiedenen Individuen, darunter Erwachsene, Jugendliche und Kinder. Auf einen Schlag tauchte somit die ganze Bandbreite einer Population auf – ein extrem seltener Glücksfall in der Erforschung des Paläolithikums.

### Keine Spur von der »naledischen« Lebensweise

Für einen Paläoanthropologen nicht minder spektakulär erscheint die Tatsache, dass nahezu alle Skelettfragmente mehrfach vorlagen, oft sogar noch im Verbund. Eine rechte Hand umfasste zum Beispiel sämtliche Teile der Handwurzel (Carpus), der Mittelhand (Metacarpus) sowie der Finger (Phalangen) mit Ausnahme des Erbsenbeins (Os pisiforme), des kleinsten Handwurzelknochens. Dazu gesellten sich nicht weniger als 110 weitere Knochen der Hand.

Der Fund einer fossilen Population aus dem Paläolithikum ist an sich schon ein bemerkenswertes Ereignis. Allerdings lieferten bislang weder Steinwerkzeuge oder Aschereste noch Tierfossilien oder andere Spuren irgend-



**DER FUNDORT RISING STAR** Ungefähr 30 Kilometer nordwestlich von Johannesburg liegen zahlreiche Fundplätze, an denen Knochenreste von Frühmenschen ans Licht kamen. Die außergewöhnlich vielen Fossilien des *Homo naledi* fanden sich in der Rising-Star-Höhle.

einer materiellen Kultur auch nur den kleinsten Hinweis auf die »naledische« Lebensweise.

Der extrem schwierige Zugang zur Dinaledi-Kammer erscheint besonderes rätselhaft: Zunächst einmal erfordert er eine Beleuchtung, also die Beherrschung des Feuers. Dann gilt es, den »Superman's Crawl« zu passieren, einen so engen Durchschlupf, dass sich nur kleine und schlanke Höhlenforscherinnen und -forscher hindurchquetschen können. So erreicht man eine der ersten Kammern, an deren Rückwand eine etwa 15 Meter hohe Steilwand, der »Drachentrücken« (Dragon's Back), erklimmt werden muss. Oben wartet das nächste Hindernis, ein äußerst schmaler und nahezu senkrecht verlaufender, zwölf Meter tiefer Schacht, durch den man schließlich in die Dinaledi-Kammer gelangt (siehe rechts »Die Knochenkammer«).

Die im selben unterirdischen Netzwerk etwa 145 Meter entfernt liegende Lesedi-Kammer lässt sich etwas leichter erreichen – vorausgesetzt, man ist im Besitz einer geeigneten Lichtquelle, was in der Steinzeit nicht selbstverständlich war. Und alles spricht dafür, dass die Kammern vor 300000 Jahren dieselben Zugänge besaßen wie heute.

Wie kamen die Toten hierher? Hierzu kursieren etliche Hypothesen: Haben Raubtiere sie hineingeschleppt? Die Knochen weisen allerdings keinerlei Bissspuren auf. Wurden sie durch eine Überschwemmung hineingespült? Dagegen spricht die Lage der Knochen. Berger ist davon überzeugt, dass Artgenossen die Körper absichtlich herbrachten, was einen Totenkult impliziert. Das klingt durchaus plausibel, wird doch die in der spanischen Sierra de Atapuerca gelegene Fundstelle Sima de los Huesos (»Knochengrube«) ebenfalls als Grabstätte interpretiert, wo Präneandertaler vor etwa 430000 Jahren ihre Toten bestatteten hatten.

Viele Paläoanthropologen weigern sich allerdings, an einen Totenkult des *H. naledi* zu glauben. Seine archaischen Züge erscheinen unvereinbar mit einer hoch entwickelten Kognition – eine zwingende Voraussetzung für kulturelle Handlungen, die dem Tod und Begräbnisriten einen Sinn geben. Vor allem der winzige Schädel, verbunden mit einem vorstehenden Oberkiefer (Prognathismus), spricht dagegen. Mit einem Schädelvolumen von 465 bis 560 Kubikzentimetern gleicht *H. naledi* eher einem Australopithecinen als anderen *Homo*-Arten. Bei einer Menschenspezies aus dem Mittelpleistozän (zwischen 781 000 bis 126 000 Jahren vor unserer Zeit) wäre mehr zu erwarten gewesen; erwiesen sich doch die Gehirne anderer Homininen dieser Periode – also vor allem die der ersten Neandertaler sowie der archaischen *Homo sapiens* – mit mehr als 1000 Kubikzentimetern als deutlich imposanter. Allerdings besaßen mindestens zwei weitere Menschenarten jener Zeit, *Homo floresiensis* und *Homo luzonensis*, ebenfalls kleine Gehirne. Aber in beiden Fällen handelte es sich um Inselbewohner, deren Hirnverkleinerung vermutlich mit ihrem Zwergewuchs zusammenhängt, mit dem sie sich an die begrenzten Ressourcen ihres jeweiligen Lebensraums anpassten.

Die Morphologie von *H. naledi* wirkt ebenfalls seltsam. Der Großteil seines Oberkörpers gleicht eher dem eines Schimpansen; die untere Körperhälfte dagegen zeigt eine fortgeschrittene Anpassung an den aufrechten Gang, die dem anatomisch modernen Menschen wesentlich mehr entspricht als den Australopithecinen. Die generelle Schädelgestalt rückt die Spezies an *Homo erectus* heran, während der Unterkiefer dem von Australopithecinen oder ersten *Homo*-Vertretern ähnelt.

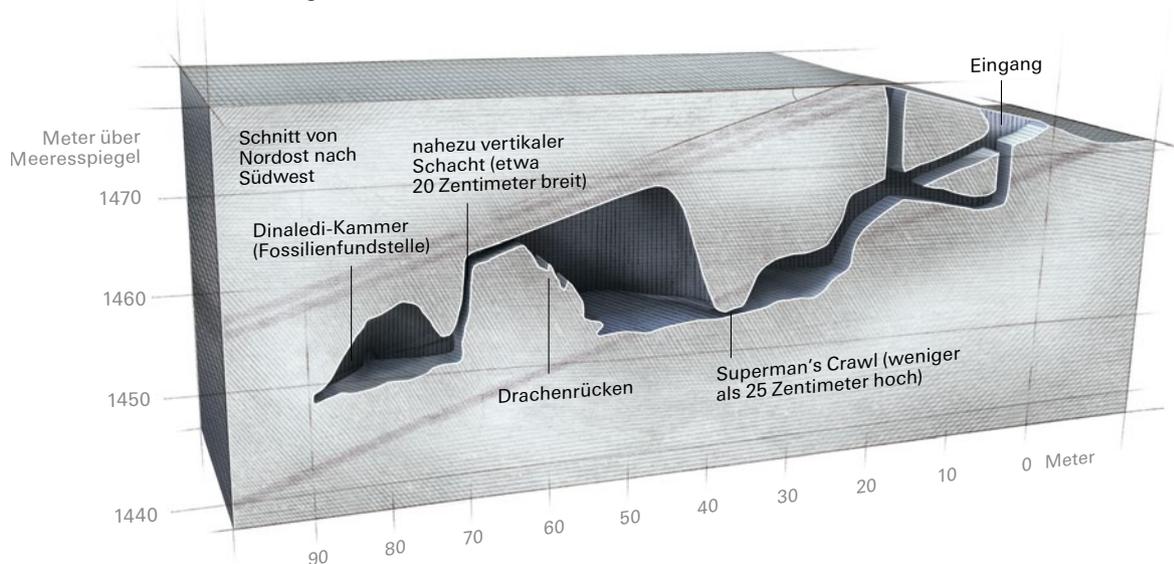
*H. naledi* besaß eine nur etwa ähnlich große Hand wie *Australopithecus sediba*; Handgelenk und Handfläche entsprachen aber eher denen eines Neandertalers oder Jetztmenschen. Die Finger waren hingegen noch stärker gekrümmt als bei einigen Australopithecinen. Das deutet auf einen vergleichsweise starren Handteller vor allem am Daumen hin, was wiederum beim Werkzeuggebrauch für eine bessere Verteilung der Kräfte gesorgt haben könnte. Im Gegenzug zeugt die Fingermorphologie von einer Fortbewegung, bei der das Klettern im Fokus stand. Zusätzlich zeigt die Hand eigene Charakteristika, deren funktionelle Bedeutung unbekannt bleibt. Wie dem auch sei: *H. naledi* war vermutlich ebenso in der Lage, Werkzeuge herzustellen wie zu klettern oder zu hangeln.

### Konnte *H. naledi* sprechen?

Anders als bei den Australopithecinen entspricht die Gestalt des Fußes von *H. naledi* eher der unseren. So fehlte dem großen Zeh die Beweglichkeit des Daumens, und der Fuß besaß ein ausgeprägtes Gewölbe – wenn auch nicht so perfekt wie bei uns –, was ein relativ energiearmes und effizientes Laufen auf zwei Beinen ermöglichte (siehe »Fuß und Schlüsselbein«). Wie die Finger der Hand unterscheiden sich die Zehenglieder allerdings sehr deutlich von denen des anatomisch modernen Menschen. Mit ihrer starken Krümmung erinnern sie an Menschenaffen oder Australopithecinen. Diese Mischung aus archaischen und abgeleiteten Merkmalen findet man auch beim Oberschenkel (Femur) sowie beim Schienbein (Tibia), deren Morphologie ebenfalls zum Teil der unseren, zum Teil der von Australopithecinen stark ähnelt.

## Die Knochenkammer

Tief im Innern birgt die Rising-Star-Höhle die extrem schwierig zu erreichende Dinaledi-Kammer. Hier lagen die Überreste von mindestens 15 Individuen des *Homo naledi*. Eine weitere Kammer namens Lesedi (hier nicht abgebildet) enthielt zusätzliche Fossilien.



JOSE MIGUEL LAVRO, MACHO DIMKS, P. L. G. M. ET AL., GEOLOGICAL AND TAPHONOMIC CONTEXT FOR THE NEW HOMOININ SPECIES HOMO NALEDI FROM THE DINALEDI CHAMBER, SOUTH AFRICA, LEUFE 4, EBENE 1, 2015, FIG. 27. SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2016, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT





**FUSS UND SCHLÜSSELBEIN** In der Dinaledi-Kammer tauchte ein nahezu vollständig erhaltener Fuß von *Homo naledi* auf (links). Das ausgeprägte Fußgewölbe deutet auf einen aufrechten Gang hin. Im Gegensatz zum anatomisch modernen Menschen sind die Zehen jedoch stärker gekrümmt, was wiederum für eine Fortbewegung durch Klettern spricht. Das rechte Schlüsselbein von *Homo naledi* aus der Lesedi-Kammer (rechts in unterschiedlichen Ansichten gezeigt) ähnelt seinem anatomischen Gegenstück beim *Homo habilis*.

**SCHÄDEL LES1** Das in der Lesedi-Kammer gefundene Fossil LES1 (Ansichten von links nach rechts: von schräg vorne, frontal, von links und von oben) offenbart den vorstehenden Kiefer.

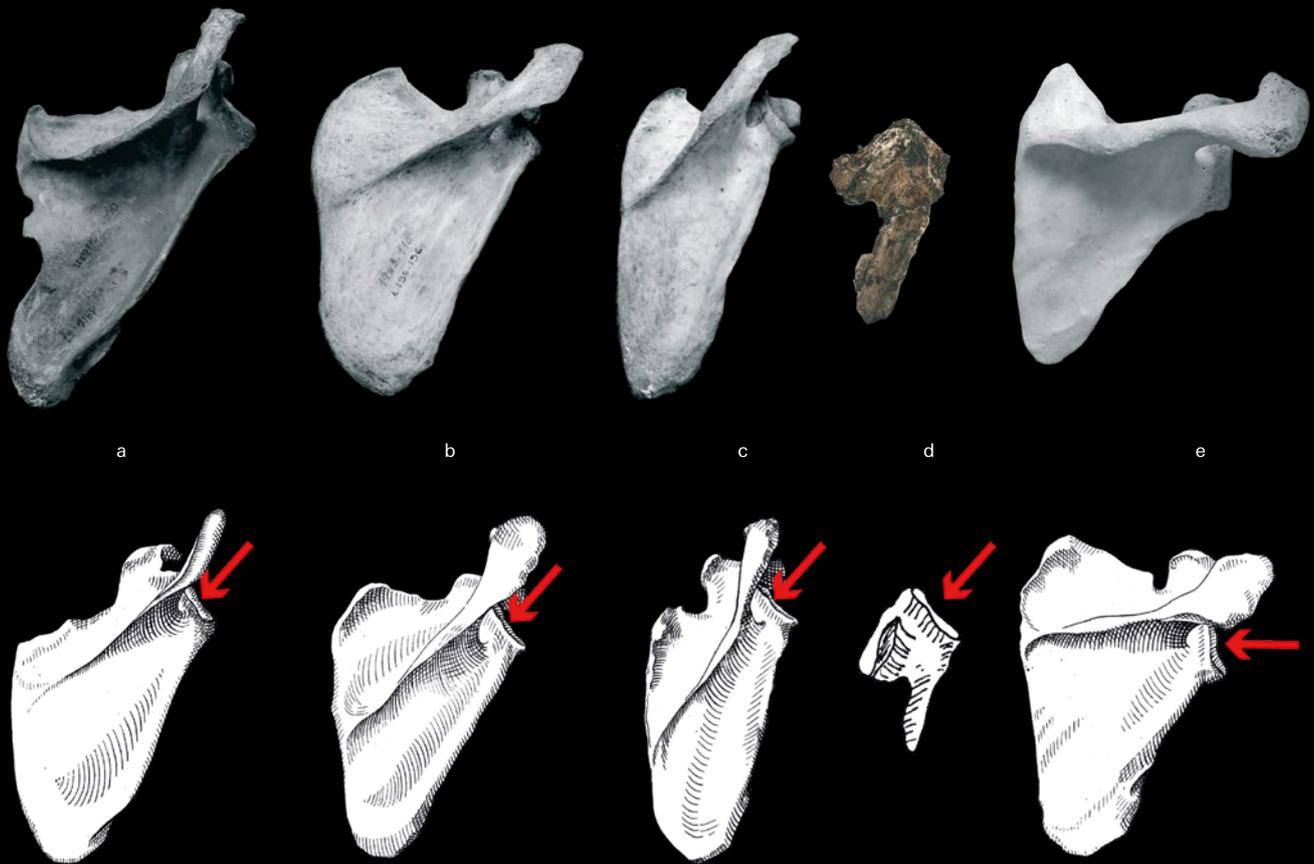


ungen des Oberarmkopfs erleichterte. Über die Schulterblätter lässt sich kaum etwas sagen, da sie nur bruchstückhaft erhalten sind. Von diesem sehr zerbrechlichen Knochen kennen wir generell nur wenige halbwegs vollständige Fossilien, selbst aus dem Jungpaläolithikum.

Vielen ist nicht klar, welche Besonderheit das Schlüsselbein darstellt: Zum einen existiert es nur bei einer Minderheit der Säugetiere, und zum anderen benötigt es die längste Zeit für die Bildung von Knochengewebe. Das Schlüsselbein ist der erste Knochen, der mit der Verknöcherung beginnt (beim menschlichen Embryo zwischen der fünften und sechsten Schwangerschaftswoche), und der letzte, bei dem sie endet (beim Menschen zwischen dem 21. und 25. Lebensjahr). Seine komplexe Krümmung erschwerte die Untersuchung, so dass der Knochen lange ignoriert wurde. Zum Glück lassen sich seine Wölbungen in zwei unterschiedlichen Ebenen zerlegen, wodurch ich zeigen konnte, dass das Schlüsselbein die meisten Informationen über die Schulterarchitektur liefert und somit Funktionsanalysen des Schulterblatts vervollständigt.

*H. naledi* besaß ein eher kurzes und robustes Schlüsselbein mit einer doppelten Krümmung wie bei heutigen Menschenaffen. Somit wies die Schulter wie bei Menschenaffen ein im Verhältnis zum Brustkorb recht hohes Schulterblatt mit einer nach oben gerichteten Gelenkpfanne auf. Dennoch zeigt das Schlüsselbein auch typisch menschliche Merkmale, wie etwa den Durchlass für das Ligamentum costoclaviculare an der Unterseite.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Schulterbau von *H. naledi* dem der vorwiegend baumbewohnenden Menschenaffen ähnelt. Vor allem aber erinnert er an *Homo habilis*. Die Schulterüberreste dieses ersten Vertreters der Gattung *Homo*, der vor 2,5 bis 1,6 Millionen Jahren in Ostafrika lebte, beschränken sich auf einige Bruchstücke



von Schulterblatt und Schlüsselbein nebst einen sehr gut erhaltenen Schlüsselbeinknochen. Letzterer erscheint kurz und robust und weist ebenfalls eine doppelte Krümmung auf. Mit anderen Worten: Die Schlüsselbeine von *H. habilis* und *H. naledi* ähneln sich stark, obwohl Letzterer deutlich jünger ist – fast 1,5 Millionen Jahre liegen zwischen den beiden Arten. Diese Beobachtung ist bemerkenswert, da die hier beschriebenen Kriterien viele Forscher zu der Annahme führten, dass *H. habilis* sich meist kletternd fortbewegte.

Man hat daher versucht, *H. naledi* als einen weiterentwickelten *H. habilis* zu interpretieren, der im südlichen Afrika überlebt hätte. Doch ein solches Szenario erscheint wenig wahrscheinlich. Zum einen wurde in dieser Region noch nie ein *H. habilis* gefunden. Zum anderen unterscheiden sich die Morphologien von Schädel und Füßen der beiden Arten einfach zu stark voneinander. Eine Evolution vom *H. habilis* zum *H. naledi* klingt daher nicht plausibel.

Somit lebte vor 300000 Jahren im südlichen Afrika eine Menschenart mit deutlichen Merkmalen eines Baumbewohners. Ihre Eigenschaften konnten sich nur im Pleistozän herausgebildet haben (etwa 2,6 Millionen bis 11700 Jahre vor unserer Zeit) – ein langer Zeitraum, der nahezu mit dem Auftreten und der Evolution der Gattung *Homo* übereinstimmt. Die Epoche war geprägt von einer Folge zyklisch wiederkehrender Kaltzeiten – zunächst alle 40000 Jahre, und dann, beginnend vor einer Million Jahre, mit einer

deutlich größeren Frequenz von 100000 Jahren. Wie die fossilen Belege sowohl aus dem südlichen als auch dem östlichen Afrika offenbaren, boten beide Regionen in dieser Zeit günstige Lebensbedingungen für die Gattung *Homo*. Wenn *H. naledi* tatsächlich Merkmale entwickelte, die ihm das Klettern ermöglichten, dann geschah das im Lauf der letzten Million Jahre im südlichen Afrika.

Welches Klima herrschte damals dort? Gegenwärtig haben wir es mit einer Warmzeit mit vorwiegend trockenen Bedingungen zu tun. Dieselben Gegebenheiten gab es schon während früherer Interglaziale. Wir können also davon ausgehen, dass *H. naledi* während seiner Entwicklung im südlichen Afrika eher mit Trockenheit konfrontiert wurde und in einer Umwelt mit nur spärlichem Baumbewuchs lebte.

Laut einer gängigen Theorie können archaische, funktionslos geworden Merkmale erhalten bleiben, solange sie evolutionär neutral wirken, also weder Vor- noch Nachteile mit sich bringen. In vielen Fällen trifft das sicherlich zu; aber die deutlichen und zahlreichen Anpassungen an das Klettern sprechen bei *H. naledi* eine andere Sprache. Wie sollten solche Eigenschaften über eine Million Jahre lang stabil bleiben? Im Lauf der Zeit dürften nach und nach alle Merkmale verschwinden, die für das Überleben oder die Fortpflanzung irrelevant sind – und eine Million Jahre sollten dafür ausreichen. Daher bin ich davon überzeugt, dass es sich hier um eine echte Anpassung an das Klettern handelt.

**SCHULTERBLATT** Typischerweise weist bei Primaten die Gelenkpfanne des Schulterblatts eher nach oben (a: Orang-Utan, b: Gorilla, c: Schimpanse). Genauso verhält es sich beim *Homo naledi* (d). Beim *Homo sapiens* zeigt dagegen die Pfanne zur Seite (e).

Wie lässt sich nun die Existenz eines kleinen menschlichen Wesens mit offensichtlichen Merkmalen eines Baumbewohners in einer weitläufigen, vegetationsarmen Region erklären? Zunächst kann Klettern in einer Savanne mit vereinzelt stehenden Bäumen durchaus eine Anpassungsstrategie darstellen. So bleiben die großen Raubtiere, die bis heute im südlichen Afrika vorkommen, während der heißen Stunden des Tages meistens inaktiv. In dieser Zeit werden menschliche Aktivitäten wie die Jagd wesentlich ungefährlicher. Dennoch sind böse Überraschungen möglich – wer dann schnell in die Höhe zu flüchten vermag, wird länger überleben. Ein Schlafplatz in einem Baumwipfel erscheint ebenfalls als gute Wahl für einen kleinen, nur spärlich bewaffneten Jäger, der weit entfernt von seiner Gruppe übernachten muss. Aber man braucht kein ausgeprägter Kletterspezialist zu sein, wenn es lediglich darum geht, ab und zu einen Baum zu erklimmen. Es stellt sich somit die Frage nach dem üblichen Unterschlupf des *H. naledi*.

### Eine Landschaft für gewiefte Kletterer

In der als »Wiege der Menschheit« bekannten Weltkulturerberegion liegen die Hauptfundstätten der südafrikanischen Australopithecinen wie die Rising-Star-Höhlen. Es handelt sich hierbei um ein trockenes Kalkplateau, in dem es jedoch während des heißen Südsommers zu relativ starken Regenfällen kommt. Das fördert durch die Auflösung von Gestein wie Kalk, Dolomit oder Gips die Entstehung zahlreicher Karsthöhlen. Solche Landschaften enthalten Hunderte von Höhlen, von denen einige als Dolinen, also schüsselförmige Senken in einem ansonsten flachen Gelände vorliegen. Hier können gewiefte Kletterer Zuflucht sowohl vor Raubtieren als auch vor Hitze finden. Außerdem gibt es Wasser, an dem es oben auf dem Karstplateau stets mangelt. Da es in unterirdischen Netzwerken zirkuliert, ist es frisch und sauber, was wiederum das Risiko für schwere Krankheiten samt Durchfall und Dehydrierung mindert.

Auf demselben Plateau wie die »Wiege der Menschheit« liegen etwa 20 Kilometer entfernt die Magaliesberge, ein 196 Kilometer langer und bis zu 1853 Meter hoher Gebirgszug. Die Bergkette wird überall von einigen dutzend Metern hohen Felswänden durchsetzt sowie von so genannten Kloofs – bis zu 100 Meter tiefen Felsklüften, in denen die erhöhte Luftfeuchtigkeit eine üppigere Vegetation hervorbringt. Hierhin dringt nur wenig Sonnenlicht vor, so dass es auch im Sommer eher kühl bleibt. Diese Region spielte offensichtlich eine wichtige Rolle in der Evolution der Homininen, befinden sich doch dort zahlreiche südafrikanische Australopithecinen-Fundstätten.

Es erscheint demnach vernünftig anzunehmen, dass sich *H. naledi* an ein Ökosystem angepasst hatte, das etliche

Höhlen und steile Felswände bot und das an bestimmten Orten wie den Kloofs durchaus nicht baumlos war. Jener Lebensraum war auf Grund seiner Feuchtigkeit in einer oft trockenen Gegend für die vorwiegend baumbewohnenden Australopithecinen attraktiv, die zweifelsohne hervorragend auf Felsen oder in Höhlen klettern konnten. Aus denselben Gründen war er natürlich auch für Raubtiere geeignet, die dort jagten, aber nicht in der Lage waren, in die Höhlen mit ihren senkrechten, schlotförmigen Eingängen einzudringen.

So könnte also *H. naledi* zur Anpassung an diesen reichen, aber gefährlichen Lebensraum gute Kletterfähigkeiten entwickelt haben. In die Höhe zu flüchten erscheint als lohnende Strategie, genügen doch schon drei oder vier

### Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



JOSE-MANUEL BENITO ALVAREZ / PUBLIC DOMAIN

Meter, um sich vor Raubtieren zu retten und zusätzlich etwas Kühle zu gewinnen. *H. naledi* war demnach wohl ein »Gelegenheitsbaumbewohner«, aber vor allem ein Felskletterer. Sein Überleben hing von seiner Fähigkeit ab, schnell an Höhe zu gewinnen. Zur selben Zeit lebte *Homo sapiens* ebenfalls im südlichen Afrika. Diese Spezies setzte auf Grund ihrer deutlich höheren Statur eher auf Mobilität, um ein größeres Gebiet zu nutzen. Und sie entwickelte als erfolgreiche Abwehr gegen Raubtiere die Strategie bewaffneter Gruppen.

Viel zu lange hat man sich die Evolution des Menschen als lineare Abfolge vorgestellt – eine Kette von *Homo habilis* über *Homo erectus* und *Homo neanderthalensis* bis zum *Homo sapiens*. Inzwischen gehen wir jedoch von einem verzweigten »Stammbusch« aus, in dem sich die verschiedenen Spezies über kulturellen und genetischen Austausch aneinander anglichen, in dem aber auch im Gegensatz dazu isolierte Formen in einem besonderen Biotop, das eine spezialisierte Lebensweise erfordern, erhalten blieben. Zu diesen isolierten Spezialisten gehörten *Homo floresiensis*, *Homo luzonensis* und eben *Homo naledi*. ◀

### QUELLEN

**Berger, L. R. et al.:** *Homo naledi*, a new species of the genus *Homo* from the Dinaledi Chamber, South Africa. *eLife*, 4, 2015

**Dirks, P. H. G. M. et al.:** Geological and taphonomic context for the new hominin species *Homo naledi* from the Dinaledi Chamber, South Africa. *eLife* 4, 2015

**Feuerriegel, E. M. et al.:** Upper limb fossils of *Homo naledi* from the Lesedi Chamber, Rising Star System, South Africa. *PaleoAnthropology* 2019

**Hawks, J. et al.:** New fossil remains of *Homo naledi* from the Lesedi Chamber, South Africa. *eLife* 6, 2017

# MEDIZIN WIDER DIE SELBSTZERSTÖRUNG

**Autoimmunkrankheiten lassen sich behandeln, indem man die Immunabwehr pauschal dämpft. Leider führt das zu unerwünschten Nebenwirkungen. Forscher arbeiten deshalb an gezielteren Therapien.**



**Marla Broadfoot** ist promovierte Molekularbiologin und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Wendell, North Carolina.

» [spektrum.de/artikel/1989097](https://spektrum.de/artikel/1989097)

▶ Als Magdalene Quintero 14 Jahre alt war, entwickelten sich schmerzhafte Geschwüre in ihrem Mund, die das Essen und Trinken enorm erschwerten. Magdalenes Haut, die normalerweise eine hellbraune Tönung besitzt, flammte auf dem Nasenrücken und auf den Wangen karmesinrot auf. An ihren Fingerspitzen bildeten sich offene Wunden, als ob sie die Hände in Säure getaucht hätte. Sie bekam Fieberschübe, Kopfschmerzen, verlor an Gewicht und war ständig müde.

Ein Jahr lang suchte das Mädchen diverse Ärzte auf, bis sie endlich erfuhr, dass sie an Lupus erythematoses erkrankt war, einer chronischen und lebensbedrohlichen Autoimmunerkrankung, die Schmerzen, Entzündungen und Schäden im gesamten Organismus verursachen kann. Es dauerte weitere zwei Jahre, bis ihr Rheumatologe – der einzige, der ihre indigene Gemeinde in Jones, Oklahoma, betreut – die medikamentöse Behandlung richtig eingestellt hatte, um die Krankheit unter Kontrolle zu bringen.

Dabei kann sich Quintero, die heute Mitte 20 ist, sogar glücklich schätzen. Ihre jüngere Schwester Isabel Hernandez leidet unter einer noch schlimmeren Ausprägung der Krankheit. Es begann mit ständigem Nasenbluten und steigerte sich, bis Isabel im Alter von 17 Jahren selbst über die Lunge Blut verlor. Sie verbrachte 88 Tage an einem Beatmungsgerät und musste anschließend wieder sprechen, essen und laufen lernen. Heute ist sie Anfang 20 und ihre Nieren versagen. Täglich muss sie ihr Blut stundenlang

**LENKWAFFEN** So genannte CAR-T-Zellen (pink) sollen helfen, Autoimmunleiden zu lindern. Sie suchen problematische Immunzellen gezielt auf und vernichten sie.

von einer Dialysemaschine filtern lassen und hofft, dass sich so bald wie möglich ein Spenderorgan für sie findet.

»Es ist herzerreißend zu sehen, welche Qualen meine Schwester erleidet«, sagt Quintero, die unlängst ein Masterstudium in Biomedizin an der Oklahoma State University abgeschlossen hat. Die Gefahr, ihr eigener Zustand könnte sich ähnlich verschlechtern, bereitet ihr Sorgen. »Aber ich bin auch dankbar, bei relativ guter Gesundheit zu sein, und glücklich darüber, dass die Medikamente bei mir eine gute Wirkung zeigen.«

Lupus erythematoses gilt als »der große Imitator«, weil seine Krankheitssymptome – Fieber, Müdigkeit und Erschöpfung, Gelenkschmerzen, Ausschläge, Kopfschmerz, Gedächtnisprobleme und Organversagen – denen zahlreicher anderer Autoimmunstörungen ähneln. Das breite Spektrum dieser Beschwerden zeigt, auf welche vielfältige Weise sich der Organismus gegen uns wenden kann, wenn ein fehlgeleitetes Immunsystem unseren eigenen Körper angreift.



SERIE

**Der Feind im eigenen Körper**

Teil 1: Februar 2022

**Angriff von innen**

Stephani Sutherland

**Daten und Fakten**

Maddie Bender, Jen Christiansen, Miriam Quick

Teil 2: März 2022

**Risikofaktor: Weiblich**

Melinda Wenner Moyer

Teil 3: April 2022

**Wider die Selbsterstörung**

Marla Broadfoot

## AUF EINEN BLICK DIE VERWÜSTUNG VERHINDERN

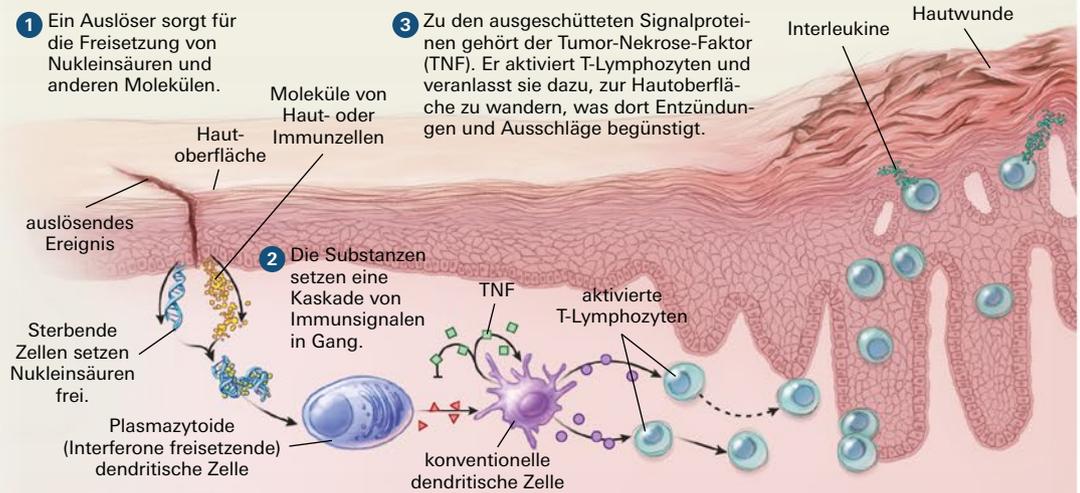
- 1** Bei Autoimmunleiden zerstört das Immunsystem den eigenen Organismus. Verhindern lässt sich das, indem man die Immunreaktion umfassend drosselt, etwa mit Steroiden.
- 2** Dieses »wahllose Draufhauen« hat allerdings unerwünschte Nebenwirkungen. Mediziner suchen deshalb nach gezielteren Ansätzen.
- 3** Zu den spezifisch wirkenden neuen Verfahren gehören Behandlungen mit Antikörpern oder gentechnisch veränderten T-Lymphozyten.

## Therapien gegen die Schuppenflechte

Bei der Psoriasis (Schuppenflechte) geraten die Horn bildenden Hautzellen außer Kontrolle. Sie wachsen und teilen sich viel schneller als normalerweise üblich, was zu geröteten, juckenden, schuppigen und entzündeten Hautwunden führt, die oft große Bereiche des Körpers bedecken. Die Ursache ist ein Angriff der Körperabwehr auf die Haut. Ein Protein namens Tumor-Nekrose-Faktor (TNF) aktiviert die Immunzellen so, dass sie sich gegen das Organ richten. Anti-TNF-Wirkstoffe, die das Eiweiß blockieren, haben sich als wirksame Therapiemittel erwiesen. Zu ihnen gehört der Antikörper Adalimumab. Bei manchen Patienten lösen sie jedoch einen neuen Schub der Krankheit aus, was Fachleute als paradoxe Psoriasis bezeichnen.

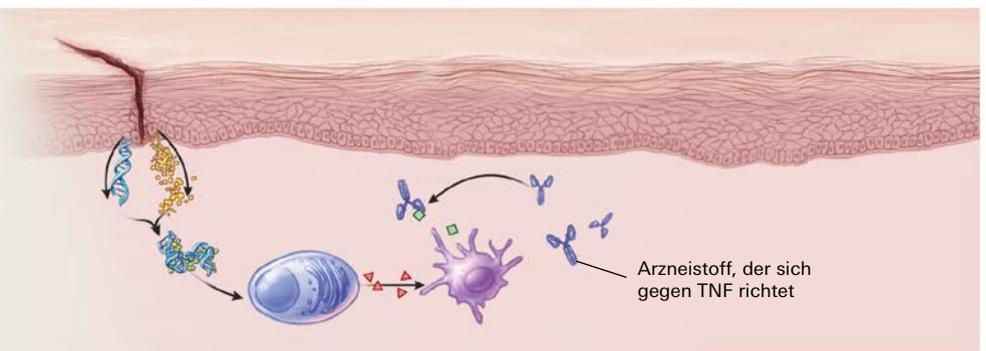
### Klassische Psoriasis

Was genau sie auslöst, ist nicht völlig verstanden. Die Erbanlagen spielen offenbar eine Rolle, aber ebenso Umwelteinflüsse. In jedem Fall wandern dendritische Zellen in die Haut ein und entwickeln sich dort zu spezialisierten Formen, die TNF freisetzen. Das Protein bringt verschiedene Arten von T-Lymphozyten dazu, sich in der Haut anzusammeln. Dort schütten diese ihrerseits Signalsubstanzen namens Interleukine aus, was die Hautzellen in einen Zustand übermäßigen Wachstums versetzt. Die Krankheit verläuft chronisch und in Schüben.



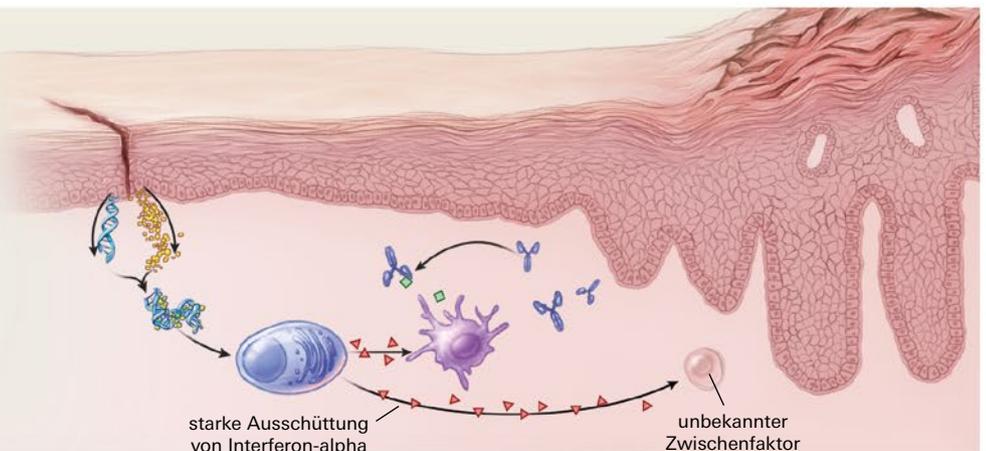
### Behandlung der Krankheit

Anti-TNF-Medikamente stoppen die verhängnisvolle Kaskade frühzeitig. Arzneistoffe wie Adalimumab und Etanercept hindern dendritische Zellen daran, TNF herzustellen und freizusetzen. Folglich bleibt die Aktivierung der T-Lymphozyten aus. Ist der Entzündungszyklus auf diese Weise unterbrochen, verschwinden die Hautwunden oder bilden sich zumindest merklich zurück.



### Ein paradoxer Effekt

Bei zwei bis fünf Prozent der Patienten führen Anti-TNF-Wirkstoffe erst recht zu einem Aufflammen der Schuppenflechte. Diese so genannte paradoxe Psoriasis entsteht möglicherweise infolge der TNF-Blockade. Dendritische Zellen produzieren neben TNF eine weitere entzündungsfördernde Signalsubstanz, das Interferon-alpha. TNF mit Arzneistoffen abzufangen, scheint die Zellen dazu zu bringen, mehr Interferon herzustellen, was – über einen unbekanntem Zwischenfaktor – ebenfalls eine Entzündungskaskade in der Haut losstritt.



Die traditionellen Verfahren, um Lupus und andere Autoimmunkrankheiten zu behandeln, bestehen letztlich darin, die außer Kontrolle geratene Immunabwehr mit Gewalt in die Knie zu zwingen. Doch das verursacht Kollateralschäden, die manchmal schlimmer sind als die Krankheit selbst. Zu den wichtigsten Methoden gehört die Gabe von Steroiden – Arzneistoffen, die wie kein anderes Mittel dazu in der Lage sind, die Körperabwehr umfassend zu dämpfen. Damit machen sie die Patienten aber anfällig für gefährliche, mitunter sogar tödliche Infektionen.

Neue Forschungsergebnisse weisen den Weg hin zu differenzierteren Therapien. Das menschliche Immunsystem ist ein Schwindel erregend komplexes Netzwerk aus diversen Zellen, Organen, Geweben und Proteinen, die miteinander über chemische Signalstoffe kommunizieren. Moderne Technologien wie Genanalysen und molekular designte Wirkstoffe ermöglichen es Mediziner, einzelne Teile dieses Netzwerks gezielt zu beeinflussen. Dabei finden sie immer wieder Angriffspunkte, um Autoimmunerkrankungen spezifischer zu behandeln, als das bisher möglich war. Einige der neuen Therapien stellen darauf ab, Autoantikörper zu unterdrücken, die sich gegen gesunde Körperzellen richten. Andere wirken, indem sie chemische Signalsubstanzen blockieren, die Immunzellen untereinander austauschen.

Allerdings funktionieren diese Methoden nicht bei allen Patienten. Oft erweist sich das Leiden als hartnäckig und behandlungsresistent. Das Problem: Um gesund zu sein und zu bleiben, muss der Organismus ein prekäres Gleichgewicht finden. Die Immunreaktion muss stark genug sein, um Eindringlinge zu vernichten, aber nicht so aggressiv, dass sie auf die eigenen Verbündeten losgeht. Die eine Hälfte der körpereigenen Abwehrtruppen – darunter die zytotoxischen T-Lymphozyten und Antikörper produzierenden B-Zellen – ist für den Kampf ausgelegt. Die andere Hälfte – vor allem die regulatorischen T-Lymphozyten – soll den Frieden wahren. Zu einer Autoimmunkrankheit kommt es, wenn Erstere außer Kontrolle gerät und Letztere sie nicht in Schach hält. »Das kann jeden von uns betreffen, weil wir alle dieses Yin und Yang in uns tragen«, sagt Michael Holers, Rheumatologe an der University of Colorado.

Steroide wie Prednison und Dexamethason sind seit Jahrzehnten die wichtigsten Mittel gegen Autoimmunkrankheiten. Solche entzündungshemmenden Substanzen legen wahllos die Produktion von Zytokinen still, also von Botenstoffen, mit denen unser Körper ein riesiges Heer von Immunzellen mobilisieren kann, um tatsächliche oder vermeintliche Bedrohungen abzuwehren. Obwohl Steroide effektiv darin sind, die Symptome von Autoimmunkrankheiten zu lindern, erfordert ihr Einsatz einen derart hohen Preis, dass manche sie als Pakt mit dem Teufel bezeichnen. Etliche Patienten müssen diese Wirkstoffe zeit ihres Lebens anwenden. Die Liste der Probleme, die damit einhergehen, ist lang: Trübungen der Augenlinse, Stimmungsschwankungen, Gewichtszunahme, Bluthochdruck, Schlafstörungen, Knochenschwund, erhöhte Blutzuckerwerte, ein gesteigertes Infektionsrisiko und vieles mehr.

Erschwerend kommt hinzu: Wenn Patienten mit Autoimmunproblemen einen Arzt aufsuchen und sich in medizini-

sche Behandlung begeben, ist ihr Körper meist bereits geschädigt. Die Autoantikörper zirkulieren dann üblicherweise schon seit Monaten oder Jahren in ihrem Organismus und haben in dieser Zeit zahllose Angriffe auf das jeweilige Zielorgan ausgelöst – gleich, ob es sich um Bauchspeicheldrüse, Nieren, Gelenke, Darm, Haut, Haarfollikel, Gehirn oder das Rückenmark handelt. Folglich sind Steroidbehandlungen eher defensiv ausgerichtet, das heißt sie zielen darauf ab, eine Verschlimmerung des Leidens zu verhindern beziehungsweise Krankheitsschübe zu dämpfen.

Jetzt aber gehen Mediziner in die Offensive: Sie machen sich daran, Autoimmunprobleme abzustellen, bevor deren schlimmste Folgen eintreten. Damit verbindet sich die Hoffnung, Vorsorge und frühzeitige Behandlung könnten die Krankheitslast verringern – genau so, wie präventives Verabreichen von Blutdruck- und Cholesterinsenkern dazu geführt hat, dass Menschen mit hohem Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen nicht so oft Herzinfarkte und Schlaganfälle erleiden. Mehrere Studien untersuchen derzeit, ob dieser Ansatz praktikabel ist. Dabei geht es um Erkrankungen wie Diabetes Typ 1, rheumatoide Arthritis, Lupus erythematodes und multiple Sklerose.

### **Antikörpergabe lässt Diabetesgefährdete seltener und später erkranken**

Erste Erfolge gibt es zu vermelden. Forscher um Kevan Herold von der Yale University rekrutierten insgesamt 76 Personen, in deren Familien Diabetes Typ 1 aufgetreten war, die selbst erhöhte Blutzuckerwerte zeigten sowie mindestens zwei Sorten Autoantikörper besaßen, die für Diabetes typisch sind. Die Teilnehmer wurden in zwei Gruppen unterteilt, von denen die erste ein experimentelles Medikament erhielt, einen monoklonalen Antikörper namens Teplizumab, der Angriffe des Immunsystems auf die Insulin produzierenden Betazellen in der Bauchspeicheldrüse unterbindet. Die zweite Gruppe bekam ein Placebopräparat. Mehr als fünf Jahre später hatten rund 50 Prozent jener Probanden, die zwei Wochen lang mit dem Antikörper behandelt worden waren, die Krankheit entwickelt. Dem gegenüber standen 78 Prozent Diabeteskranke in der Placebo-Gruppe. Und laut dem Forscherteam waren diejenigen Teilnehmer, die trotz Arzneistoffgabe einen Diabetes ausgeprägt hatten, dank der Behandlung im Schnitt rund drei Jahre später erkrankt, als es ohne Medikament der Fall gewesen wäre.

»Das sind gute Nachrichten«, kommentiert die Endokrinologin Carla Greenbaum vom Benaroya Research Institute diese Studie. Diabetes Typ 1 präge das Leben der Betroffenen rund um die Uhr, daher sei jedes Verzögern der Krankheitssymptome ein Gewinn. Mediziner hoffen, durch weiterentwickelte Antikörpertherapien die krankheitsfreie Zeit zu verlängern und vielleicht sogar Wege zu finden, die Zerstörung der Betazellen ganz zu verhindern. Greenbaum ist zuversichtlich, dass sich der Ansatz ebenso gegen andere Autoimmunkrankheiten bewähren könnte.

Multiple Sklerose (MS) ist eine weitere Autoimmunerkrankung, bei der ein frühes Erkennen wichtig ist. Sie betrifft das zentrale Nervensystem und verursacht Schäden in der weißen Substanz des Gehirns und Rückenmarks, indem sie die Hüllen von Nervenzellen angreift. Im zurückliegenden

Jahrzehnt haben Forscher solche Zerstörungen bei hundert Menschen gefunden, die keine erkennbaren MS-Symptome hatten und nur deshalb auffielen, weil sie zum Abklären einer Gehirnerschütterung oder einer Migräne einen Hirnscan durchliefen. Der Neurologe David Hafler von der Yale University vermutet, dass diese stillen Fälle, die Fachleute als »radiologisch isoliertes Syndrom« (RIS) bezeichnen, das früheste bekannte MS-Stadium darstellen könnten. Seine Kollegen und er haben eine große Studie gemeinsam mit dem Biotech-Unternehmen Genentech gestartet, um RIS-Betroffenen den Antikörper Ocrelizumab zu verabreichen, der üblicherweise zum Behandeln späterer MS-Stadien dient. Zudem würde Hafler gern Biomarker finden, die MS noch früher ankündigen und ein medizinisches Eingreifen ermöglichen, bevor erste Nervenschäden aufgetreten sind. »Am besten wäre es, Menschen mit hohem Erkrankungsrisiko zu identifizieren und sie zu behandeln, bevor die Krankheit überhaupt einsetzt«, sagt er.

Arzneistoffe wie monoklonale Antikörper bieten den großen Vorteil, dass sie spezifisch gegen jene Elemente des Immunsystems vorgehen, die das jeweilige Autoimmunproblem verursachen, während sie – anders als Steroide – die restliche Körperabwehr unbehelligt lassen. Sie erweitern die therapeutischen Optionen, bergen aber auch Risiken. Bei manchen Patienten erweisen sie sich als Fehlschlag oder verschlimmern die Symptome sogar. Es hat sich herausgestellt, dass eine gesunde Balance des Abwehrsystems nicht leicht zu erreichen ist.

Mehrere zielgerichtete Therapien konzentrieren sich auf ein Zytokin namens Tumor-Nekrose-Faktor (TNF). Es spielt bei vielen Autoimmunkomplikationen eine Rolle und löst schädliche Entzündungsreaktionen aus. Monoklonale Antikörper, die seine Wirkung blockieren, dienen häufig zum Behandeln von rheumatoider Arthritis, entzündlichen Darmerkrankungen und Schuppenflechte. Bei multipler Sklerose hingegen verschlechtern TNF-Hemmer das Krankheitsbild, wie klinische Studien gezeigt haben. Darüber hinaus haben die Rheumatologen Minyoung Her von der Inje University (Südkorea) und ihr Kollege Arthur Kavanaugh berichtet: Gezielte Therapien, die Autoimmunprobleme bei dem einen Patienten unterdrücken, können dieselben Probleme bei einer anderen Person gerade erst auslösen.

Der einzige neue Arzneistoff, der in den zurückliegenden 60 Jahren gegen Lupus erythematoses zugelassen wurde, ist der spezifisch wirkende Antikörper Belimumab. Er blockiert ein Zytokin namens B-Lymphozyten-Stimulator (abgekürzt BlyS), das Autoimmunreaktionen verlängert. Belimumab hilft vielen Betroffenen, aber nicht allen. Das deutet darauf hin, dass die Symptome bei verschiedenen Menschen auf unterschiedlichen molekularen Mechanismen beruhen, sagt die Rheumatologin Judith James von der Oklahoma Medical Research Foundation.

Technologische Fortschritte ermöglichen es Forscherinnen und Forschern zunehmend, die Unterschiede zwischen Patienten einerseits und Krankheitsmechanismen andererseits auf genetischer Ebene zu analysieren. Dabei erkennen sie häufig Muster, die bisherige klinische Misserfolge erklären und den Weg zu künftigen Erfolgen weisen. Bei der Autoimmunkrankheit Alopecia areata beispielsweise



**ENTFLAMMT** Die Autoimmunkrankheit Lupus erythematoses tritt in verschiedenen Formen auf. Viele Betroffene leiden unter fleckigen roten Hautausschlägen, etwa wie hier gezeigt am Rücken.

greift das Abwehrsystem die Haarfollikel an, was zu kreisförmig umschriebenen kahlen Stellen führt. Um das zu unterbinden, setzten Mediziner früher häufig Arzneistoffe ein, die sich gegen die scheinbar verwandten Hautkrankheiten Schuppenflechte und atopische Dermatitis bewährt haben. Das funktionierte aber nicht. Der Grund hierfür wurde klar, als die Genetikerin Angela Christiano von der Columbia University analysierte, welche Erbanlagen jeweils beteiligt sind. Sie fand heraus: »Alopecia areata basiert auf ganz anderen genetischen Mechanismen als die anderen beiden Erkrankungen.« Der autoimmun bedingte Haarausfall hat demnach mehr mit rheumatoider Arthritis, Zöliakie und Diabetes Typ 1 gemein als mit einem Hautleiden. »Das ist ein eindrucksvolles Beispiel dafür, wie die Genetik unseren Blick auf medizinische Phänomene völlig verändern kann«, sagt Christiano.

### **Dauerhafter Fehlalarm im Körper führt zu überzogener Immunreaktion**

Die Genetikerin hat ein Gen mit der Bezeichnung *ULBP3* identifiziert, das es dem Organismus ermöglicht, Notsignale zu senden. Mit dem entsprechenden Protein teilen geschädigte Körperzellen den T-Lymphozyten des Immunsystems mit, dass sie sie vernichten sollen. Normalerweise wird *ULBP3* nur aktiv, wenn eine Zelle entartet, von Erregern infiziert ist oder abstirbt. Bei Alopecia areata jedoch bleibt die Erbanlage in Haarfollikeln dauerhaft eingeschaltet und gibt permanent Alarm, woran ein Zytokin namens Januskinase (JAK) mitwirkt. Hemmstoffe dieses Zytokins, so genannte JAK-Inhibitoren, nutzen Mediziner oft, um zerstörerische Autoimmunsignale bei rheumatoider Arthritis zu unterbinden. Wie Christiano zeigte, stoppen JAK-Inhibitoren den Angriff der T-Lymphozyten auf die Haarfollikel. Damit behandelt, wachsen den Patienten wenige Monate später wieder Haare, und ihre kahlen Stellen am Kopf verschwinden allmählich. Mehrere klinische Studien, die den Therapieansatz testen, befinden sich im fortgeschrittenen Stadium.

Fünf JAK-Inhibitoren sind bereits für andere Autoimmun- und entzündliche Krankheiten zugelassen und zahlreiche weitere in Entwicklung. Leider haben solche zielgerichteten Behandlungsmethoden immer wieder unerwartete Nebenwirkungen. So sah sich die US-Arzneimittelbehörde FDA Mitte 2021 genötigt, auf problematische Aspekte eines JAK-Inhibitors aufmerksam zu machen, der zur Behandlung der rheumatoiden Arthritis dient. Die Anwendung des Arzneistoffs geht demnach mit einem erhöhten Risiko für Herzprobleme und Krebserkrankungen einher.

»Aus solchen Gründen lohnt es sich bei Autoimmunproblemen immer, nach derjenigen Behandlungsmethode zu suchen, die das kleinere Übel darstellt«, sagt Aimee Payne, Dermatologin an der University of Pennsylvania. Sie arbeitet an der Entwicklung einer Gentherapie mit, die den Pemphigus vulgaris lindern soll, eine seltene Autoimmunkrankheit der Haut. Betroffene entwickeln Autoantikörper, die ein Protein namens Desmoglein-3 (DSG3) angreifen, das die Hautzellen zusammenhält. Wird das Eiweiß zerstört, entstehen am ganzen Körper schmerzhafte Blasen. Die Patienten müssen mitunter wegen lebensbedrohlicher Infektionen wie Verbrennungsoffer behandelt werden.

Payne hat ein zielgerichtetes Behandlungsverfahren entwickelt, das nur jene B-Lymphozyten ausschalten soll, von denen die zerstörerischen Autoantikörper stammen, andere B-Zellen aber unversehrt lässt. An Mäusen ist die Methode getestet. Unser Immunsystem bringt viele Milliarden B-Lymphozyten in diversen Variationen hervor. Die meisten produzieren Antikörper, um Viren und Bakterien zu bekämpfen. Diejenigen, die Autoantikörper gegen DSG3 herstellen, sind zum Glück leicht zu erkennen, denn sie tragen einen charakteristischen Biomarker auf ihrer Oberfläche – nämlich eine Version eben jenes Autoantikörpers. »In gewisser Weise sind diese B-Zellen stümperhafte Attentäter, denn sie zeigen überall herum, wen sie zu attackieren gedenken, bevor sie tatsächlich angreifen«, sagt Payne.

Um die problematischen B-Lymphozyten loszuwerden, setzte Payne eine Technik ein, die ihr Kollege Michael Milone ausgearbeitet hat und mit der sich bösartige B-Zellen bei manchen Blutkrebskrankungen vernichten lassen.

**PSORIASIS Scharf begrenzte Hautrötungen, überzogen mit hellen Schuppen, sind ein typisches Merkmal der Schuppenflechte. Oft entstehen sie an den Extremitäten und am Kopf.**



FUSSSTREIF / STOCK.ANDRE.COM

Das Verfahren namens CAR-T-Zelltherapie (siehe »Spektrum« Oktober 2017, S. 34) setzt auf gentechnisch veränderte zytotoxische T-Lymphozyten, die über eine Art Zielsuchkopf verfügen, den so genannten chimären Antigenrezeptor (CAR). Mit seiner Hilfe spüren sie spezifische Körperzellen auf und zerstören sie. Durch sorgfältiges molekulares Design des CAR bestimmen die Forscher, gegen welches Ziel sich die Attacke richtet. Payne und ihr Team versahen die zytotoxischen T-Lymphozyten mit einem CAR, der Autoantikörper gegen DSG3 erkennt. Er führt die Zerstörerzellen direkt hin zu den problematischen B-Lymphozyten.

Als die Wissenschaftler diese CAR-T-Lymphozyten in Mäuse einbrachten, die an Pemphigus vulgaris erkrankt waren, verschwanden deren Hautblasen. Payne gründete daraufhin ein Start-up-Unternehmen, um den Therapieansatz in klinischen Studien zu testen. Da die Behandlung mit lebenden Zellen erfolgt, die sich dauerhaft vermehren und dabei ihren Zielsuchkopf behalten, besteht die Hoffnung, dass eine einzige Infusion dieser Zellen ausreichen könnte, um die Krankheit jahrzehntelang zurückzudrängen.

### **Die Körperabwehr in die richtige Bahn lenken – oder aber sie abmildern**

Andere Forscher setzen quasi auf den umgekehrten Ansatz, um den Immunstatus der Betroffenen wieder ins Lot zu bringen. Statt zytotoxische T-Lymphozyten scharf zu schalten, indem sie sie mit einem CAR ausrüsten, verstärken sie die immundämpfende Wirkung regulatorischer T-Lymphozyten, um die überaktive Körperabwehr zu unterdrücken. Das Verfahren befindet sich im frühen Teststadium, hat sich in Tiermodellen für Colitis ulcerosa, multiple Sklerose und rheumatoide Arthritis aber schon als viel versprechend erwiesen.

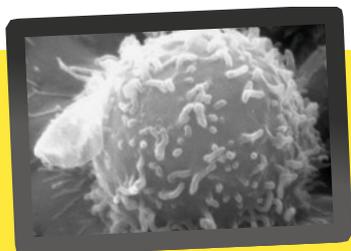
Arzneistoffe sind die wichtigste Komponente im Umgang mit Autoimmunkrankheiten. Doch es gibt auch nicht-medikamentöse Therapien, die mitunter faszinierende Ansätze verfolgen.

Viele unserer grundlegenden Körperfunktionen – Herzfrequenz, Blutdruck, Verdauung, Atemtätigkeit oder sexuelle Erregung – unterliegen der Kontrolle zweier gegensätzlicher Systeme. Beide gehören zum vegetativen Nervensystem, das sich der willkürlichen Kontrolle größtenteils entzieht. Der so genannte Sympathikus aktiviert Körperfunktionen, die zum Abbau von Energiereserven führen und den Organismus in erhöhte Leistungsbereitschaft versetzen. Typisch für die Wirkung des Sympathikus ist das instinktive Verhalten »flieh oder kämpfe« in Stresssituationen. Der Parasympathikus gilt als sein Gegenspieler; er fördert den Aufbau von Energiereserven und die Regeneration des Organismus, etwa durch Entspannung und Verdauungsaktivität. Unsere Fähigkeit, von einem Zustand in den anderen zu wechseln, hängt vom Vagusnerv ab, einem Bündel aus rund 100000 Nervenfasern, das vom Hirnstamm bis zum Zwerchfell verläuft und sich dann weiter in Richtung Herz, Darm und anderer Organe verästelt. Einige Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass der Vagusnerv nicht mehr so arbeitet, wie er sollte, wenn sich eine Autoimmunerkrankung entwickelt. »Das ist etwa so, wie wenn die Bremse Ihres Autos versagt, während Sie einen Berg hinunterfah-

ren«, sagt der Neurochirurg Kevin Tracey vom Feinstein Institute for Medical Research in Manhasset, New York.

Tracey hat gezeigt, dass die elektrische Stimulation des Vagusnervs mit schwachen Stromstößen dazu beitragen kann, überaktive Immunzellen zu beruhigen. Er und andere Forscher analysierten, wie elektrische Impulse, die ein implantiertes Gerät aussendet, sich vom Hals aus den Vagusnerv hinunter bis zur Milz fortpflanzen, wo sie die Produktion des Tumor-Nekrose-Faktors und weiterer entzündungsfördernder Substanzen herunterfahren. Ersten klinischen Studien zufolge lassen sich mit einem solchen Ansatz die Symptome der rheumatoiden Arthritis und des Morbus Crohn lindern. Dazu muss die Stromquelle nicht einmal in den Körper eingebracht werden – es reicht offenbar, den Nerv nahe am Ohr durch die Haut hindurch anzuregen. Ein von Tracey mitbegründetes Unternehmen hat vor Kurzem eine große klinische Studie dazu gestartet. Für die Behandlung anderer Krankheiten sind Vagusnerv-Elektrostimulatoren schon heute zugelassen, etwa bei Epilepsie und Depression.

Eine weitere unkonventionelle Methode setzt darauf, das Immunsystem mit einem deutlich weniger technischen Eingriff ins Gleichgewicht zu bringen: die Transplantation von Stuhl eines gesunden Spenders in den Darm der erkrankten Person. In der alten chinesischen Medizin diente ein Stuhlbrei namens »gelbe Suppe« dazu, schwere Lebensmittelvergiftungen und lebensbedrohlichen Durchfall zu behandeln. Heute ist die Fäkaltransplantation ein anerkanntes Therapieverfahren für gefährliche Darminfektionen, die vom Bakterium *Clostridium difficile* verursacht werden.



TIMOTHY TRICHE, NATIONAL CANCER INSTITUTE, 1976

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Vor einigen Jahren demonstrierte die Gastroenterologin Jessica Allegretti vom Brigham and Women's Hospital in Boston: Die Übertragung von Stuhl kann nicht nur kritische *C.-difficile*-Infektionen bekämpfen, sondern auch gleichzeitig vorliegende chronisch-entzündliche Darmerkrankungen (CED) lindern. Die CED geht mit schweren Verdauungsproblemen einher, die aus Entzündungen resultieren. Einige Wissenschaftler zeigen sich davon überzeugt, dass daran Autoimmunreaktionen mitwirken, obgleich das umstritten ist. So oder so könnte in Fäkaltransplantationen ein großes medizinisches Potenzial stecken, betont Allegretti, die ein einschlägiges Forschungsprogramm leitet.

Das Mikrobiom im Darm gesunder Menschen unterscheidet sich deutlich von dem bei Personen, die an Colitis ulcerosa leiden, einer Unterform der CED. Die Krankheit scheint mit Autoimmunprozessen einherzugehen; offenbar gewinnen entzündungsfördernde Darmmikroben dabei die

Oberhand gegenüber entzündungshemmenden. In mehreren randomisierten klinischen Studien wird untersucht, ob Stuhltransplantationen dagegen helfen. Bei etwa jedem dritten behandelten Patienten schwächten sich die Symptome ab, das ist eine ähnliche Erfolgsquote wie nach der Gabe immununterdrückender Medikamente. Weitere Studien sind auf dem Weg, um zu ermitteln, ob die Methode ebenso gegen rheumatoide Arthritis, multiple Sklerose, Alopecia areata und Lupus wirkt.

## Nach Fäkaltransplantationen drohen gefährliche Infektionen

Fäkaltransplantationen sind bislang kein offiziell zugelassenes Therapieverfahren, und es steht nicht zu erwarten, dass sie in absehbarer Zeit eine bedeutende Rolle im Kampf gegen Autoimmunerkrankungen spielen werden. Allegretti warnt zudem: »Verbreitet herrscht der Glaube, diese Behandlung sei »natürlich« und damit irgendwie sicherer als die etablierten Arzneistoffe, was so nicht stimmt.« Die langfristigen Folgen von Stuhlübertragungen seien weitgehend unbekannt, daher sei es wichtig, sie in validen Studien zu untersuchen. Die wissenschaftliche Literatur liefert zahlreiche Fallberichte über Stuhltransplantationen, die Patienten auf eigene Faust durchgeführt haben und dabei gründlich scheiterten. Ein Mann beispielsweise, der an Colitis ulcerosa litt, versuchte sich mit dem Stuhl seines kleinen Sohns und seiner Frau zu behandeln – und landete mit einer Zytomegalovirus-Infektion im Krankenhaus.

Viele Menschen, die an Autoimmunerkrankungen leiden, sind frustriert wegen der mangelnden Behandlungsmöglichkeiten und angesichts von Medizinern, die kaum Hilfe bieten und wenig Hoffnung vermitteln. Etliche versuchen, ihr Schicksal selbst in die Hand zu nehmen, und greifen dabei auf experimentelle oder alternative Therapieverfahren zurück. Einer von ihnen ist Joe Person, Lupus-Patient aus Washington und heute in seinen späten Dreißigern. Als er vor vielen Jahren die Diagnose erhielt, erstellte er einen Entscheidungsbaum mit möglichen Tests, medikamentösen Therapien, Komplikationen und Folgewirkungen. Während seines ersten Termins beim Rheumatologen verlangte er, das Malariamedikament Hydroxychloroquin verabreicht zu bekommen, das die Symptome der Krankheit lindern kann und in Studien daraufhin getestet wird, ob es für frühe Interventionen oder gar als vorbeugendes Mittel taugt.

Diesem zeitigen Handeln schreibt Person heute zu, die Krankheit in Schach gehalten zu haben, obwohl er unter Erschöpfungszuständen leidet und das Gefühl hat, sein Gehirn arbeite manchmal langsam. »Die Rheumatologen haben mir quasi vermittelt, ich solle einfach nur dasitzen und darauf warten, dass schon irgendwann ein wirksames Medikament zugelassen werde«, sagt Person, »doch das läuft meinem Überlebensinstinkt zuwider. Ich möchte so viel wie möglich aktiv tun, schon allein, um das Gefühl zu haben, alle Möglichkeiten auszuschöpfen und der Krankheit einen Schritt voraus zu sein.« Nachdem er auf roh vegane Ernährung umgestellt hatte, ließen die Krankheitssymptome nach – flammten aber wieder auf, als er eine Allergie gegen Rohkost entwickelte. Zudem beschaffte er sich eine

Sonnenbank, um zu testen, ob ultraviolettes Licht die Lupus-Symptome lindert, allerdings ohne Erfolg.

Einige Wissenschaftler zeigen sich offen für komplementär- oder alternativmedizinische Behandlungsmethoden. Tracey zufolge könnten Verfahren wie die Akupunktur theoretisch Stress und Entzündungen mindern, indem sie das Nervensystem in geeigneter Weise aktivieren, obwohl er hinzufügt, dass es bei solchen Ansätzen »manchmal schwierig ist, Ursache und Wirkung zu belegen«. Andere Forscher haben vergleichsweise einfach umzusetzende Tipps parat. Um ein gesundes Darmmikrobiom ohne Stuhltransplantation zu fördern, empfiehlt Allegretti eine ballaststoffreiche Ernährung und eine vorwiegend pflanzliche Diät. James wiederum rät Menschen mit Autoimmunproblemen, mit dem Rauchen aufzuhören und ausreichend zu schlafen, was dem Körper helfe, Entzündungen in Schach zu halten – »im Grunde all das, was Ihre Mutter Ihnen empfohlen hat«.

Der Alltag von Magdalene Quintero und ihrer Schwester Isabel Hernandez ist maßgeblich von der Krankheit bestimmt. Hernandez nimmt 19 verschiedene Medikamente ein, um die Symptome ihres Lupus zu kontrollieren. Quintero benötigt derzeit »nur« zwei Arzneimittel und hat die zurückliegenden Jahre bei der Oklahoma Medical Foundation gearbeitet, um unter Anleitung von Judith James nach besseren Behandlungsverfahren zu suchen – zunächst im Labor, dann im klinischen Umfeld. Sie erinnert sich daran,

wie ihre Großtante – ebenfalls an Lupus erkrankt – die letzten Lebensjahre im Rollstuhl verbrachte, da ihre Knochen von der Steroidbehandlung zerstört waren. »Damals gab es noch nicht die Therapieoptionen, die wir heute haben«, sagt Quintero. Sie bewirbt sich jetzt auf eine medizinische Anstellung. Damit möchte sie eines Tages in eine Position kommen, in der sie den Kampf gegen jene Krankheit, die ihre Familie so gequält hat, maßgeblich vorantreiben kann. ◀

#### QUELLEN

**Allegretti, J. R. et al.:** Inflammatory bowel disease outcomes following fecal microbiota transplantation for recurrent *C. difficile* infection. *Inflammatory Bowel Diseases* 27, 2021

**Christiano, A. M. et al.:** Alopecia areata is driven by cytotoxic T lymphocytes and is reversed by JAK inhibition. *Nature Medicine* 20, 2014

**Herold, K. C. et al.:** An anti-CD3 antibody, Teplizumab, in relatives at risk for Type 1 Diabetes. *New England Journal of Medicine* 381, 2019

**Payne, A. S. et al.:** Reengineering chimeric antigen receptor T cells for targeted therapy of autoimmune disease. *Science* 353, 2016

**Trentin, F. et al.:** Effectiveness, tolerability, and safety of Belimumab in patients with refractory SLE: A review of observational clinical-practice-based studies. *Clinical Reviews in Allergy and Immunology* 54, 2018

# Spektrum PLUS<sup>+</sup>

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS

21. MAI 2022 – ZÜRICH

## Flug im Space- oder Flugsimulator & Vortrag »Risk Management im Cockpit«

Fliegen Sie im B777-Flugsimulator oder erforschen Sie im Space-Simulator Galaxien, Sternennebel und Planeten. Genießen Sie einen spannenden Vortrag zum Thema »Risk Management im Cockpit« sowie ein Apéro-Catering. Preisreduziert für Abonentinnen und Abonnenten

Anmeldung und weitere Vorteile:

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

# BIOMEDIZIN

## »KRITIKER ÜBERSCHÄTZEN DIE RISIKEN EXTREM«

**Gain-of-Function-Experimente sind stark umstritten. Laut der Virologin Silke Stertz brauchen wir diese Forschung trotzdem. Warum, erklärt sie im Gespräch mit »Spektrum«.**

» [spektrum.de/artikel/1989100](https://spektrum.de/artikel/1989100)

Gain-of-Function (GoF) ist ein Bereich der biomedizinischen Forschung, bei dem Wissenschaftler einen Organismus mit neuen Fähigkeiten ausstatten und prüfen, wie sich das auf seine Eigenschaften auswirkt. Im Zuge solcher Experimente haben Forscher vor einigen Jahren veränderte Viren erschaffen, die möglicherweise eine Pandemie hätten auslösen können. Das führte zu heftigen Debatten darüber, ob das Risiko akzeptabel sei. 2014 stoppte die US-Regierung vorübergehend die Finanzierung von GoF-Versuchen. Im selben Jahr forderte die Cambridge Working Group, ein internationaler Zusammenschluss von Fachleuten: GoF-Studien, bei denen potenzielle Pandemieerreger entstehen können, »sollten eingeschränkt werden, bis eine quantitative, objektive und glaubwürdige Bewertung der Risiken, des eventuellen Nutzens und der Möglichkeiten zur Risikominderung (...) erfolgt ist«.

Manche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler halten solche Arbeiten aber für notwendig – gerade heute, da wir ständig damit rechnen müssen, dass sich neue Krankheitserreger um den Globus verbreiten. Eine von ihnen ist Silke Stertz, Professorin am Institut für Medizinische Virologie der Universität Zürich. »Spektrum« sprach mit ihr über das Für und Wider der GoF-Forschung und über die Hypothese, der Covid-19-Erreger könne bei derartigen Versuchen aus einem Labor entkommen sein.

### **Frau Professor Stertz, was genau ist Gain-of-Function-Forschung?**

Der Begriff bedeutet zunächst einmal nur, dass man einem Organismus eine Funktion verleiht, die er vorher nicht hatte. Nur ein kleiner Teil der GoF-Forschung ist umstritten. Dabei geht es um Organismen, die das Potenzial haben, eine Pandemie auszulösen. Verändert man sie so, dass sie sich besser verbreiten können, schwerer krank

machen oder dass Medikamente oder Impfungen schwächer gegen sie wirken, klingt das für viele Menschen beunruhigend. Das betrifft jedoch sehr wenige Experimente.

### **Was wäre in diesem Bereich denn harmlos?**

In meiner Arbeitsgruppe beispielsweise verändern wir Viren so, dass sie fluoreszieren – einfach damit man sehen kann, wo in der Wirtszelle sie sich ansammeln. Wir geben den Viren eine Funktion, die sie vorher nicht hatten, die aber in keiner Weise problematisch ist. Sie wirkt sich nicht darauf aus, wie leicht sich die Erreger verbreiten oder wie gut man dagegen impfen kann.

### **2015 erzeugten Forscher um den Biologen Ralph Baric ein künstliches Coronavirus, indem sie Spike-Proteine eines Fledermauserregers mit einem Sars-CoV-Abkömmling kombinierten. Das Mischvirus infizierte menschliche Zellen und Labormäuse, was sich durch Antikörper oder Impfung nicht verhindern ließ. Wozu macht man so etwas?**

Zunächst einmal lässt sich diskutieren, ob das wirklich GoF-Forschung war. Denn der Sars-CoV-Abkömmling konnte schon vorher Mäuse und menschliche Zellen befallen. Die Forscher nahmen an, die Fledermausvirus-Spike-Proteine würden ihn abschwächen, so dass er weniger infektiös wäre. Wie das Experiment zeigte, war dem nicht so. Das hätte eigentlich eine Warnung sein können: Wir müssen aufpassen, welche Viren in Fledermäusen zirkulieren und von dort möglicherweise auf uns überspringen. Im Grunde hat der Versuch belegt, dass Coronaviren von Fledermäusen pandemisches Potenzial haben. Wie wir heute wissen, hat man das damals nicht ernst genug genommen.



UNIVERSITÄT ZÜRICH / FRANK BRÜDERLI

## Silke Stertz

Die Biomedizinerin arbeitet als Professorin am Institut für Medizinische Virologie der Universität Zürich. Nach Studium und Promotion an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg ging sie für vier Jahre in die USA. Dort forschte sie als Postdoc an der Mount Sinai School of Medicine, New York. 2011 kam sie an die Uni Zürich. Ihr wissenschaftliches Interesse gilt zoonotischen Influenzaviren – also solchen, die von Tieren auf Menschen überspringen.

**Ein Team um den Virologen Ron Fouchier infizierten Frettchen im Jahr 2012 mit genetisch veränderten H5N1-Vogelgrippeviren, die sich von Tier zu Tier über die Atemwege verbreiteten. Theoretisch hätten sie auch Menschen anstecken können. Ist das nicht gefährlich?**

Würde so ein Virus freigesetzt, hätte es tatsächlich Pandemiepotenzial. Doch wie wahrscheinlich ist das? Meiner Meinung nach überschätzen Kritiker das Risiko extrem. Diese Experimente laufen in abgeschotteten Laboren, in denen diverse Schutzmechanismen gelten. Alles, was infektiös ist, wird in einer Sicherheitswerkbank bearbeitet.

Falls die versagt, trägt der Experimentator eine Atemschutzmaske beziehungsweise einen Überdruckanzug, um Infektionen zu verhindern. Sollte sich trotzdem jemand anstecken, greifen Quarantänemaßnahmen. Zudem steht das Labor insgesamt unter Unterdruck, so dass kein Material entweichen kann. All das macht die Versuche sehr, sehr sicher. Den Grad dieser Sicherheit exakt zu beziffern, ist allerdings schwierig bis unmöglich.

**Was genau wollten Fouchier und sein Team denn mit ihrem Experiment zeigen?**

H5N1-Viren, genau wie H7N9, beschäftigen uns schon seit Jahren. Das sind eigentlich Vogelgrippeerreger, aber wir sehen immer wieder, dass sie auch Menschen anstecken, etwa auf Hühnerfarmen. Die Betroffenen erkranken oft sehr schwer; ihre Sterblichkeitsrate liegt bei über 60 Prozent. Zum Glück geben sie die Infektion meist nicht an andere Personen weiter. Doch irgendwann kann das passieren, und wir wüssten gern, welche Eigenschaften die Viren hierfür erwerben müssen. Arbeiten wie die Fouchier-Studie helfen, das zu klären. Wir können dann dort, wo solche Erreger häufig auf Menschen überspringen – vor allem in Asien –, deren Erbgut verstärkt sequenzieren und auf entsprechende Veränderungen prüfen.

**Wie realistisch ist das? Lassen sich Wild- oder Nutztierbestände wirklich auf ihre Krankheitserreger hin überwachen?**

Sicher nicht lückenlos, allein schon wegen der begrenzten finanziellen Mittel. Man muss hier Prioritäten setzen, und ebendarum ist es wichtig zu wissen, wonach wir überhaupt suchen. Aus der Baric-Studie beispielsweise hätte man schon 2015 schließen können, dass Sars-CoV-ähnliche Fledermausviren, die in China zirkulieren, pandemisches Potenzial haben. Eine mögliche Konsequenz daraus wäre gewesen, alle paar Monate gezielt Proben zu nehmen – es ist ja bekannt, wo es dort Fledermaushöhlen und -populationen gibt. Alles zu überwachen, ist nicht möglich, aber mit richtig gesetzten Schwerpunkten kann man dem Virus ein Stück voraus sein.

**Auch, wenn man nur punktuell Proben nimmt?**

Ja. Für Influenza gibt es schon heute weltweite Überwachungsprogramme, um immer wieder zu prüfen, ob gefährliche Erreger in den Vögeln zirkulieren. Dazu muss jedoch bekannt sein, wonach man eigentlich sucht, und hierbei helfen GoF-Experimente. Ich halte das jedenfalls für besser, als gar nichts zu machen und einfach abzuwarten, was passiert.

**Kritiker fordern, jegliche GoF-Forschung zu unterlassen, bei der potenzielle Pandemieerreger entstehen können. Ist das vernünftig?**

Sicher nicht. Wir wollen verstehen, was da draußen passiert, um uns dann mögliche Gegenmaßnahmen zu überlegen. Das einfach komplett zu verbieten, halte ich für einen Irrweg. Unstrittig ist, dass man in jedem einzelnen Fall die Risiken eines solchen Experiments gegen seinen möglichen Nutzen abwägen muss.

**Wie viele Arbeitsgruppen weltweit betreiben GoF-Versuche mit potenziellen Pandemieerregern?**  
Vielleicht 20, doch das ist nur eine grobe Schätzung.

**Worüber forschen Sie selbst?**

Über zoonotische Influenzaviren. Mein Team und mich interessieren die zellbiologischen Aspekte einer Infektion, also wie die Erreger mit ihren Wirtszellen interagieren. Wir untersuchen an Zellkulturen, wie das Virus an seine Wirte andockt und in sie eindringt, welche Rezeptoren es dabei nutzt und so weiter. GoF-Experimente machen wir nicht und arbeiten auch nicht mit Tiermodellen.

**Welche biologische Schutzstufe müssen Labore haben, in denen GoF-Forschung stattfindet?**

Drei oder vier. Das kommt auf das jeweilige Projekt an, aber auch auf das Labor selbst. Es gibt Einrichtungen der Stufe drei, die einem Vierer-Labor sehr ähnlich sind und wo man solche Experimente sicher durchführen kann. Dort existiert eine lange Liste an Maßnahmen, Sicherheitsstufen und Notfallplänen, die nacheinander in Kraft treten, falls irgend etwas schiefgehen sollte.

**Und die genügt Ihrer Meinung nach?**

Die existierende Laborausstattung ist sehr gut. Außerdem hat der Streit um diese Forschung, denke ich, ein höheres Risikobewusstsein hervorgebracht – nicht nur bei den

# »Meiner Meinung nach hat die Pandemie gezeigt, dass wir Gain-of-Function-Forschung brauchen«

direkt Beteiligten, sondern in der ganzen Virologie-Gemeinschaft. An meinem Institut etwa sensibilisieren wir die Studenten jetzt stärker in Biosicherheitskursen, und andere Einrichtungen machen das ebenso. Zudem sind in vielen Ländern weitere Hürden errichtet worden, um GoF-Experimente genehmigt zu bekommen, etwa in Form erschwerter Antragsverfahren. Meiner Ansicht nach reicht das aus.

**Die Cambridge Working Group forderte 2014, der Nutzen und die Risiken potenziell gefährlicher GoF-Forschung müssten quantitativ und objektiv bewertet werden. Ist das geschehen?**

## Wichtige Stationen der GoF-Forschung

Gain-of-Function-Experimente sind nichts Neues. Laut dem verstorbenen Biowaffenexperten Raymond Zilinkas beispielsweise, der am Middlebury Institute of International Studies tätig war, hat die Sowjetunion ab den frühen 1970er Jahren waffenorientierte GoF-Forschung betrieben. Zehntausende Menschen seien in Programme involviert gewesen, die darauf abzielten, Krankheitserreger übertragbarer und pathogener zu machen. Dabei sei es um Anthrax- und Pestbakterien sowie um Ebola- und Marburg-Viren gegangen.

1975 trat die Biowaffenkonvention in Kraft. Dieser völkerrechtliche Vertrag untersagt, biologische Waffen zu entwickeln, herzustellen, zu lagern oder anderweitig anzuschaffen, und ächtet somit auch waffenorientierte GoF-Forschung.

183 Staaten sind dem Abkommen beigetreten.

In jüngerer Vergangenheit sind mehrere (nicht militärische) GoF-Studien erschienen, die für Aufsehen sorgten und intensive Debatten auslösten:

- Im Jahr 2000 berichtete ein Team um Paul Masters vom New York State Department, einen Mischerreger geschaffen zu haben, indem es ein Maus-Coronavirus mit den Stachelproteinen eines Katzen-Coronavirus ausstattete. Der Erreger erlangte dadurch die Fähigkeit, Katzen zu infizieren.

- 2012 experimentierten Wissenschaftler um Ron Fouchier vom Erasmus Medical Center mit einem H5N1-Vogelgrippevirus. Sie veränderten das Erbgut des Erregers so, dass er Frettchen befiel. Nach mehreren Tier-zu-Tier-Übertragungen

konnte er sich durch die Luft verbreiten. Hierfür waren nur wenige Mutationen nötig, wie die Forscher betonten – was die Gefahr berge, das Virus könnte sie spontan erwerben.

- Im selben Jahr gelang es einer Arbeitsgruppe um Yoshihiro Kawao von der University of Wisconsin-Madison, menschliche H1N1-Viren mit veränderten Proteinen eines H5N1-Virus zu versehen. Die Erreger waren daraufhin im Stande, stärker an Säugerzellen zu koppeln und sich durch die Luft zu übertragen. Abermals bedurfte es dafür lediglich weniger Mutationen.

- 2015 zeigten Ralph Baric von der University of North Carolina und seine Kollegen: Ein Sars-CoV-Abkömmling, der Stachelproteine eines Fledermaus-Coronavirus besitzt, kann menschliche Zellen und Labormäuse infizieren. Mit Antikörpern

Nein. Wie soll man das quantitativ und objektiv bewerten? Das halte ich für unmöglich. Das widerspricht auch dem Wesen der Grundlagenforschung. Es ist nicht immer abzuschätzen und auszurechnen, was wir aus einem Experiment lernen werden und wovor uns das schützen wird. Ich halte das für eine überzogene Forderung, die so nicht zu erfüllen ist.

**Befürworter sagen, GoF-Forschung helfe Seuchen vorzubeugen, indem sie im Labor aufdeckt, welche Veränderungen einen Erreger gefährlich machen – so dass man gewarnt ist, falls solche Veränderungen in der Natur auftreten. Der Biomediziner Steven Salzberg von der Johns Hopkins University hält dieses Argument für lächerlich. Er meint, es gebe keinen Grund anzunehmen, ein künstlich erschaffenes Virus werde so aussehen wie ein natürliches. Hat er Recht?**

Selbstverständlich wird ein natürliches Virus nicht zu 100 Prozent identisch sein mit einem aus dem Labor. Aber es geht ja auch nicht darum, einzelne Mutationen aufzudecken, sondern übergeordnete Mechanismen zu verstehen. Nehmen wir die Baric-Studie: Was die Forscher dort demonstriert haben, ist später in der Natur wirklich passiert. Sie haben gezeigt, dass Fledermausviren, die dem ursprünglichen Sars-CoV ähneln, menschliche Zellen infizieren können. Ein sehr naher Verwandter dieser Erreger hat

dann tatsächlich die jetzige Pandemie ausgelöst. Die Studie belegte, dass so etwas möglich ist und von welchen Viren hier Gefahr ausgeht. Gleiches hat sich bei Versuchen mit Influenzaviren gezeigt: In Natur und Labor traten keine identischen Mutationen auf; der Mechanismus, der die Viren übertragbar macht, war jedoch sehr ähnlich. Es stimmt einfach nicht, dass man aus diesen Experimenten nichts lernt.

**Manche meinen, mit Hilfe von GoF-Forschung ließen sich vorsorglich Impfstoffe gegen gefährliche Erreger entwickeln, die eines Tages auftauchen könnten.**

Ich denke schon, das ist möglich, gerade bei Influenzaviren. Erkennt man im Labor, dass eine Variante zu entstehen droht, die zwischen Menschen übertragbar ist, wäre es sicher sinnvoll, eine Impfung dagegen zumindest schon mal im Tiermodell zu testen. Einfach nichts zu tun, nur weil aus der Natur eventuell nicht genau die Mutante kommen wird, die man im Labor gesehen hat, halte ich für keine gute Strategie. Wir profitieren auch in der jetzigen Pandemie davon, dass Forscher bereits seit Jahrzehnten Sars-CoV und andere Coronaviren untersuchen und Möglichkeiten ausloten, dagegen zu impfen.

**Vorhersagen aus GoF-Studien sind hypothetisch, Laborunfälle sind es nicht. 2014 etwa brachte die**

beziehungsweise einem Totimpfstoff ließ sich das nicht unterbinden.

Besonders die Fouchier- und die Kawaoka-Studie zogen heftige Reaktionen nach sich. Wissenschaftler, Behördenvertreter, Herausgeber wichtiger Fachzeitschriften und Experten des nationalen US-Beirats für Biosicherheit stritten darüber, ob die Details der Arbeiten veröffentlicht werden dürften. Eines der Argumente: Terroristen könnten die Daten nutzen, um gefährliche Viren als Biowaffe zu erschaffen. 2014 gab die US-Regierung bekannt, GoF-Forschung an potenziellen Pandemieviren nicht weiter zu finanzieren. 2016 veröffentlichte der Biosicherheits-Beirat zahlreiche Empfehlungen dazu, wie GoF-Studien zu beaufsichtigen seien. 2017 wurde der Finanzierungsstopp wieder aufgehoben.

Der Deutsche Ethikrat legte dem Bundestag 2014 die Stellungnahme »Biosicherheit – Freiheit und Verantwortung in der Wissenschaft« vor, in der es um GoF-Forschung geht. Darin empfahl er, Wissenschaftler für einen möglichen Missbrauch ihrer Ergebnisse zu sensibilisieren; zum Verhindern eines solchen Missbrauchs einen bundesweit gültigen Forschungskodex zu erstellen; problematisch erscheinende Studien nicht zu fördern; und einschlägige Forschungsarbeiten gesetzlich zu regeln. Kurz darauf veröffentlichten die Deutsche Forschungsgemeinschaft und die Nationale Akademie der Wissenschaften gemeinsam »Empfehlungen zum Umgang mit sicherheitsrelevanter Forschung«, die sich sowohl an einzelne Wissenschaftler als auch ihre Forschungsinstitutionen richten.

**Frank Schubert** ist Redakteur bei »Spektrum«.

#### QUELLEN

Gain-of-Function-Forschung und Dual-Use Research of Concern. Sachstandsbericht für den Deutschen Bundestag, 23. September 2021

[www.bundestag.de/resource/blob/867492/6b63ac17cdf8ff5fb8aa7d2d8c-78fe7f/WD-8-077-21-pdf-data.pdf](http://www.bundestag.de/resource/blob/867492/6b63ac17cdf8ff5fb8aa7d2d8c-78fe7f/WD-8-077-21-pdf-data.pdf)

Biosicherheit – Freiheit und Verantwortung in der Wissenschaft. Deutscher Ethikrat, 7. Mai 2014

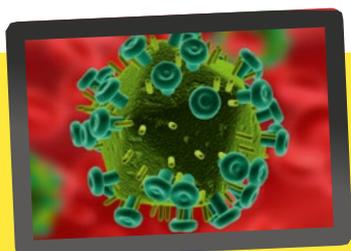
[www.ethikrat.org/fileadmin/Publikationen/Stellungnahmen/deutsch/stellungnahme-biosicherheit.pdf](http://www.ethikrat.org/fileadmin/Publikationen/Stellungnahmen/deutsch/stellungnahme-biosicherheit.pdf)

Wissenschaftsfreiheit und Wissenschaftsverantwortung. DFG und Leopoldina, 28. Mai 2014

[www.leopoldina.org/uploads/tx\\_leopublication/2014\\_06\\_DFG\\_Leopoldina\\_Wissenschaftsfreiheit-verantwortung\\_D.pdf](http://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2014_06_DFG_Leopoldina_Wissenschaftsfreiheit-verantwortung_D.pdf)

**Missachtung von Sicherheitsvorschriften mehr als 70 Mitarbeiter der US-Behörde CDC in Gefahr, sich mit Anthrax zu infizieren. Im gleichen Jahr tauchten in einem NIH-Labor längst vergessene Fläschchen mit Pockenviren aus den 1950er Jahren auf. Die Cambridge Working Group geht von durchschnittlich zwei Laborunfällen pro Woche aus.**

Fehler im Laboralltag passieren, aber das bedeutet nicht gleich, ein Virus kommt frei und jemand infiziert sich. Die vielen Schutzstufen in Hochsicherheitslaboren sind dafür da, so etwas zu verhindern, und das tun sie in aller Regel auch. Ich halte die Angabe der Cambridge Working Group für irreführend. Sie suggeriert, dass zweimal pro Woche eine Freisetzung oder Infektion passiert, und das trifft sicherlich nicht zu.



SCIEPRO / GETTY IMAGES / ISTOCK

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

### Sind Fälle bekannt, wo Krankheitskeime aus dem Labor entwichen?

2007 gelangten Erreger der Maul-und-Klauen-Seuche aus einem englischen Labor in die Umwelt, die waren allerdings nicht verändert. Die Forscher hatten das Virus nicht vorschriftsgemäß inaktiviert, so dass es infektiös ins Abwasser kam und Erkrankungsfälle bei Tieren in der Umgebung auslöste.

### Welche Alternativen zu GoF-Experimenten gibt es? Kann man das beispielsweise auch im Computermodell machen?

Solche Forderungen kommen meist aus fachfremden Kreisen. GoF-Versuche sind mit viel Aufwand verbunden, deshalb verfolgen die meisten Forscher schon von sich aus erst einmal alternative Ansätze. So haben Virologen jahrelang versucht, die Übertragbarkeit von Influzaviren in so genannten Loss-of-Function-Experimenten zu untersuchen. Das heißt, man nimmt beispielsweise ein saisonales Influzavirus und verändert es so, dass es nicht mehr übertragbar ist. Daraus hat man einiges gelernt, aber es stellte sich heraus, dass Loss-of-Function-Versuche nicht alle Merkmale aufdecken können, die einen Erreger übertragbar machen. An dem Punkt kam man nur noch mit GoF weiter. Die Vorstellung, es gäbe Alternativen dazu, etwa in Form von Computermodellen, ist oft realitätsfern.

**Manche vermuten, Sars-CoV-2 könnte das Ergebnis eines Laborunfalls sein. Im Mai 2021 forderten 18 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen im**

**Fachblatt »Science«, diese These in Betracht zu ziehen. WHO-Untersuchungen hingegen kamen zu dem Schluss, sie sei extrem unwahrscheinlich. Was halten Sie davon?**

Man kann das nicht von vornherein ausschließen, doch ich sehe den Grund für diese Debatte nicht. Es gibt hochgradig überzeugende Hinweise auf einen natürlichen Ursprung des Virus. Wir kennen zahlreiche eng verwandte Viren, die in Tieren zirkulieren und ganz ähnliche Charakteristika aufweisen wie Sars-CoV-2 – das passt alles sehr gut zusammen. Hingegen habe ich bis jetzt keine überzeugende Evidenz für die Laborhypothese gesehen.

**2018 beantragten Wissenschaftler der Organisation EcoHealth Alliance US-Forschungsgelder, um Coronaviren eine so genannte Furin-Spaltstelle hinzuzufügen. Der Antrag wurde nicht bewilligt, aber spricht das trotzdem für die Laborhypothese? Schließlich hat Sars-CoV-2 eine solche Spaltstelle.**

Es gibt in der Natur diverse ähnliche Coronaviren, die ebenfalls eine Furin-Spaltstelle besitzen. Sie lassen sich in Wildtierpopulationen verlässlich nachweisen. Das ist für mich eine wesentlich überzeugendere Evidenz, als ohne triftigen Grund darüber zu spekulieren, ob jemand dieses Merkmal künstlich hinzugefügt hat.

**Ein Fledermaus-Virustyp aus Laos hat ein Genom, das zu 96,8 Prozent mit dem von Sars-CoV-2 übereinstimmt. Lässt das noch Zweifel am natürlichen Ursprung des Erregers?**

Die Ähnlichkeit beschränkt sich nicht nur auf laotische Varianten. Man hat in den zurückliegenden zwei Jahren gezielt Proben von Fledermäusen der ganzen Region genommen und dabei zahlreiche verschiedene Viren gefunden, die eine sehr hohe Übereinstimmung mit Sars-CoV-2 haben. Es ist das Gesamtbild, das die natürliche Herkunft für mich sehr plausibel macht.

**Müssen wir jederzeit mit einem neuen Pandemieerregere aus der Natur rechnen?**

Ich denke, ja. Unser Verhalten hat sich im zurückliegenden Jahrhundert stark verändert. Wir betreiben exzessive Landnutzung, dringen in Lebensräume von Wildtieren ein, und wenn dabei Erreger auf uns überspringen und eine infektiöse Krankheit verursachen, ist sie wegen der hohen Besiedlungsdichte, der globalen Vernetzung und des weltweiten Reiseverkehrs viel schwerer einzugrenzen als früher.

**Wie hat Covid-19 unseren Blick auf die GoF-Forschung verändert?**

Meiner Meinung nach hat die Pandemie gezeigt, dass wir diese Forschung brauchen. Hätte man die Baric-Studie 2015 ernster genommen und die richtigen Schlüsse daraus gezogen, hätten wir weit besser auf Covid-19 vorbereitet sein können. ◀

Das Gespräch führte **Frank Schubert**, promovierter Biophysiker und Redakteur bei »Spektrum«.



FRANZI SCHÄREL / FLORIAN FREISTETTER (FOTOGRAFIE) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVE COMMONS ORIGINALS) (BY-SA) (01.EGAL0001)

# FREISTETTERS FORMELWELT DENKFEHLER BEIM MÜNZWURF

**Es gibt keine ausgleichende Gerechtigkeit bei zufälligen Ereignissen. Das hat schon viele um ihr Geld gebracht – denn im Kasino können Statistikirrtümer teuer werden.**

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

► [spektrum.de/artikel/1989103](http://spektrum.de/artikel/1989103)

Im Spielkasino könnte man wunderbar lernen, wie Wahrscheinlichkeitsrechnung funktioniert. Andererseits neigt man dazu, solche Etablissements zu meiden, wenn man sich länger mit der Mathematik des Glücksspiels beschäftigt hat. Denn die ist nicht nur recht eindeutig, was die eigenen Gewinnchancen angeht, sondern kann einem manchmal den Spaß verderben. Ein bisschen Ahnung schadet aber trotzdem nicht – auf jeden Fall dann, wenn man nicht dem »Spielerfehlschluss« erliegen will.

Betrachten wir dazu das simpelste Glücksspiel: den Münzwurf. Die Chance, dass die Münze auf »Kopf« landet, beträgt 50 Prozent; ebenso die Wahrscheinlichkeit, »Zahl« zu ergeben. Dass sie genau auf der Kante stehen bleiben könnte, ignorieren wir der Einfachheit halber. Wie wahrscheinlich ist es nun, bei zwei Würfeln zweimal hintereinander Kopf zu erhalten? Die Ereignisse sind vollkommen unabhängig voneinander, das Resultat des zweiten Wurfs wird vom ersten nicht beeinflusst. Nach den Regeln der Stochastik muss man beide Wahrscheinlichkeiten miteinander multiplizieren:  $0,5 \cdot 0,5 = 0,25$ . Die Chance auf zweimal Kopf nacheinander liegt also bei 25 Prozent. Das lässt sich leicht verallgemeinern:

$$P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i)$$

Auch wenn die Formel kompliziert aussieht, besagt sie bloß, dass man bei  $n$  unabhängigen Ereignissen das Produkt der entsprechenden Wahrscheinlichkeiten bilden muss. Der Spielerfehlschluss besteht nun darin, bei der Berechnung die Vorgeschichte miteinzubeziehen. Angenommen, man hat schon viermal hintereinander Kopf geworfen. Die Wahrscheinlichkeit für fünf aufeinander folgende gleiche Ergebnisse beträgt laut obiger Formel  $0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 0,03125$  beziehungsweise 3,125 Prozent.

Das ist nicht gerade viel, und man könnte nun denken, dass es in diesem Fall wesentlich wahrscheinlicher

ist, dass der fünfte Münzwurf Zahl ergibt. Genau hier liegt der Fehlschluss: Beim nächsten Wurf liegt die Chance immer noch bei 50 Prozent. Das gilt für jeden Wurf; egal was davor passiert ist. Die Wahrscheinlichkeit von 3,125 Prozent bezieht sich auf die Situation vor dem allerersten Wurf der Serie – als das Ergebnis aller fünf Würfe unbekannt war. Wenn die Münze aber schon viermal gefallen ist, spielen diese Resultate keine Rolle mehr für die Wahrscheinlichkeitsberechnung; ihr Zustand ist bekannt.

Unsere Intuition sagt zwar, es müsste langsam mal Zahl kommen, wenn davor so oft Kopf geworfen wurde. Aber dieses Gefühl täuscht uns. Viele Menschen haben dadurch jede Menge Geld verloren. Denn der Zufall lässt sich nicht täuschen – und ein Spielkasino schon gar nicht.

Das gilt auch für Wettsysteme wie die »Martingale«. Die Strategie sieht vor, nach einer verlorenen Wette den Einsatz zu verdoppeln und weiterzumachen, bis man gewonnen hat. Das klingt nach einer sicheren Sache: Wenn ich etwa 10 Euro auf Kopf gesetzt habe, die Münze aber auf Zahl landet, setze ich 20 Euro und werfe nochmal. Sollte ich erneut verlieren, erhöhe ich den Einsatz auf 40 Euro und so weiter, bis die Münze irgendwann das gewünschte Ergebnis liefert.

Rein theoretisch kann man so tatsächlich nicht verlieren. In der Praxis besteht aber die Chance, dass der zum Weiterspielen benötigte Einsatz sehr schnell unvorstellbar hohe Werte erreicht. Und selbst wenn man am Ende gewinnt, erhält man durch die akkumulierten Verluste immer nur den beim ersten Wurf gesetzten Betrag! Hinzu kommt, dass Spielkasinos keine beliebig hohen Einsätze erlauben.

Mit einem Martingale-System kann man also sehr viel verlieren und äußerst wenig erhalten. Kasinos ist die Mathematik der Wahrscheinlichkeit genau bekannt. Deswegen sind sie die Einzigen, die dort langfristig gewinnen.

# WASSERDAMPF DAS ÜBERSEHENE TREIBHAUSGAS

**Mehr Wasserdampf in einer wärmeren Atmosphäre liefert Treibstoff für Hurrikane und verursacht Überschwemmungen durch Starkregen.**



**Jennifer Francis**, Vizedirektorin am Woodwell Climate Research Center in Massachusetts (USA), forscht seit vielen Jahren zur Erwärmung der Arktis und zur weltweiten Verteilung von Wasserdampf und Energie in der Atmosphäre. Sie ist Mitglied im wissenschaftlichen Beirat der Zeitschrift »Scientific American«.

» [spektrum.de/artikel/1989106](https://spektrum.de/artikel/1989106)

## AUF EINEN BLICK WASSER ENERGIESPEICHER

- 1** Wenn sich das Klima erwärmt, steigt die Luftfeuchtigkeit: Denn es verdunstet mehr Wasser aus Ozeanen, und wärmere Luft kann mehr davon aufnehmen.
- 2** Die feuchtigkeitsgeschwängerte Luft fungiert wie ein Turboantrieb für Wirbelstürme. Auch andere heftige Niederschläge werden stärker und bringen verheerende Überflutungen mit sich.
- 3** Durch Rückkopplungen verstärkt der Wasserdampf in der Luft seinerseits den Klimawandel.

Im Sommer 2021 hat sich schmerzhaft gezeigt, welche folgenschweren Wetterlagen wir auf Grund der fortschreitenden globalen Erwärmung künftig erwarten müssen. Mehr als 180 Menschen sind bei den schweren Unwettern mit ihren darauf folgenden Überschwemmungen in der Eifel und im Bergischen Land im Juli ums Leben gekommen. Stellenweise gingen dort innerhalb von zwei Tagen über 200 Millimeter Regen nieder. Allein im Einzugsgebiet der Ahr rauschten am 14. Juli mehr als 90 Liter Wasser pro Quadratmeter auf die Erde, wie der Deutsche Wetterdienst gemessen hat – sonst fallen dort im ganzen Monat durchschnittlich 70 Liter. Und in anderen Teilen der Welt brachen die sommerlichen Niederschläge ebenfalls Rekorde: Ende Juli fiel in der chinesischen Provinz Henan die sonst in einem Jahr übliche Regenmenge von gut 600 Millimetern innerhalb von nur drei Tagen. Mitte August löste im US-Bundesstaat Tennessee ein scharfer Knick im Jetstream Wolkenbrüche mit mehr als 400 Millimeter

Regen in 24 Stunden aus, mindestens 20 Menschen starben in den Fluten.

Dabei waren das noch nicht einmal Hurrikane oder andere tropische Wirbelstürme. Doch bald tobte Hurrikan Ida durch den Golf von Mexiko, der neunte Tropensturm der atlantischen Hurrikansaison 2021. Am 28. August handelte es sich noch um einen Kategorie-1-Hurrikan mit anhaltenden Windgeschwindigkeiten von 130 Stundenkilometern. Kaum 24 Stunden später schwoll Ida mit Wucht zu Kategorie 4 an, fast doppelt so schnell wie laut Definition des US-National Hurricane Center für einen sich rasch intensivierenden Sturm üblich. Sie traf mit Windgeschwindigkeiten von 240 Stundenkilometern auf die Küste von Louisiana und hinterließ über eine Million Menschen tagelang ohne Strom, mehr als 600 000 ohne Wasser. Ida wütete weiter in nordöstlicher Richtung und lud in New York City rekordbrechende 80 Millimeter Regen in einer Stunde ab. Der Sturm forderte mindestens 80 Menschenleben.

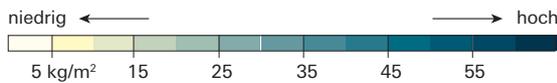
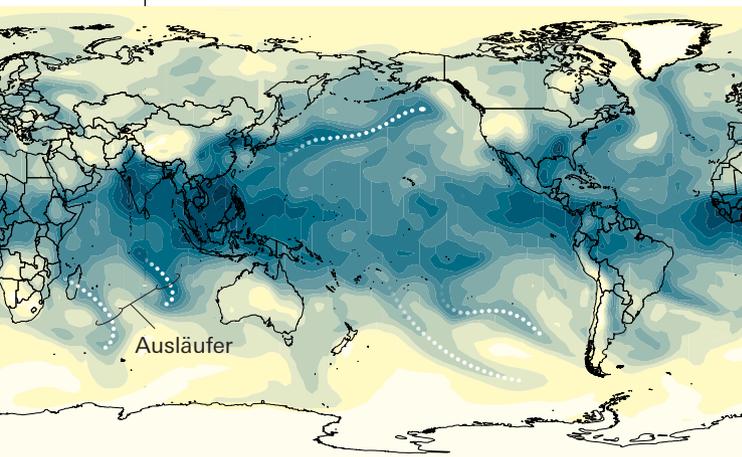
**RUHE VOR DEM STURM**  
An der Ostküste von Queensland, Australien, braut sich ein Sturm zusammen.

## Die Welt wird nasser

Wasserdampf ist in der Erdatmosphäre ungleichmäßig verteilt. Gewöhnlich kommt er in Äquatornähe reichlich vor, während sein Gehalt zu den Polen hin abnimmt, doch Stürme und Wind können feuchte tropische Luftmassen dorthin verschieben. Allgemein steigt der Wasserdampfanteil in der Luft mit fortschreitender globaler Erwärmung, und zwar über dem Land mehr als über den Ozeanen.

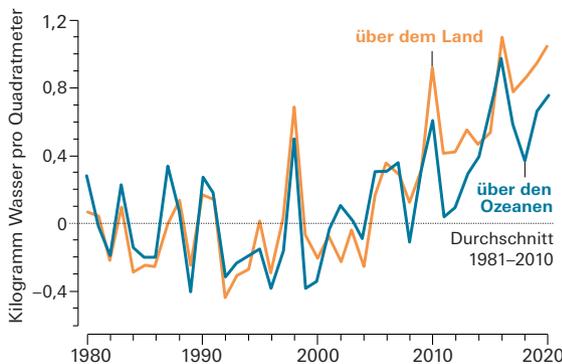
### Wasser in der Atmosphäre am 31. August 2021

Die Farbintensität zeigt an, wie viel Wasser (in Kilogramm) in einer vertikalen Luftsäule über einem Quadratmeter Erdoberfläche stehen würde, falls jedweder Wasserdampf vollständig kondensiert und als Niederschlag gefallen wäre. Hurrikan Ida ist als dunkler Kreis über dem Südosten der USA zu erkennen.



### Zunahme des Wasserdampfs in der Luft

In den letzten Jahren hat die Wasserdampfmenge weltweit sowohl über den Ozeanen als auch über dem Land zugenommen, im Vergleich zum jährlichen Durchschnitt von 1981 bis 2010.



JEN CHRISTENSEN, KARTE NACH NOAA PHYSICAL SCIENCES LABORATORY (PSL), WEB-BASED REANALYSIS INTERCOMPARISON TOOL (WRIT) (PSL.NOAA.GOV/DATA/ATMOSPHERE/WRIT); DIAGRAMM NACH KALNAY, E. ET AL.: THE NCEP/NCAR REANALYSIS-40-YEAR PROJECT, BULLETIN OF THE AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY 77, 1996 / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2021, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Gemeinsam war allen diesen Katastrophen die Anwesenheit von reichlich Wasserdampf in der Luft. Wasser im gasförmigen Zustand trägt entscheidend dazu bei, dass Stürme verheerender werden und sich der Klimawandel beschleunigt. Denn wenn sich Ozeane und Atmosphäre aufheizen, steigt durch Verdunstung der Wasserdampfgehalt der Luft (siehe »Die Welt wird nasser«). Wärmere Luft wiederum kann mehr Dampf aufnehmen, bevor er sich durch Kondensation in Wolkentropfen verwandelt – ein Vorgang, der zuweilen sintflutartige Regenfälle zur Folge hat. Weltweit hat der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre allein seit Mitte der 1990er Jahre um vier Prozent zugenommen. Dieser Anstieg erscheint zwar gering, ist jedoch für das Klimasystem von großer Bedeutung: Eine wasserdampfreichere Atmosphäre liefert zusätzliche Energie und Feuchtigkeit für die Entstehung von Sommergewittern, Nordoststürmen (»Nor'easters«) an der Ostküste der USA, Hurrikanen und selbst Schneestürmen. Tropische Stürme wie Ida gewinnen durch zusätzlichen Wasserdampf schneller an Intensität.

Fachleute erwarten schon seit Längerem eine Wasserdampfzunahme in der Atmosphäre durch den Klimawandel und dadurch ausgelöste »Dunststürme«, die mehr Regen und Schnee bringen könnten als die Stürme, die wir aus den vergangenen Jahrzehnten kennen. Messungen bestätigen, dass sich Starkregenereignisse weltweit zunehmend häufen und intensiver werden (siehe »Regen wird heftiger«). Seit Ende der 1980er Jahre konnten in den USA etwa ein Drittel der durch Überschwemmungen verursachten Sachschäden – etwa 73 Milliarden Dollar – auf die Zunahme starker Niederschläge zurückgeführt werden.

Im August 2017 etwa brachte Hurrikan Harvey Teilen des Stadtgebiets von Houston (Texas) innerhalb von fünf Tagen unfassbare 1500 Millimeter Regen, was selbst erfahrene Meteorologen und Meteorologinnen staunen ließ. Zeitweise fielen aus den Regenbändern des Wirbelsturms bis zu 150 Millimeter Niederschlag pro Stunde. Einer Analyse der Initiative »World Weather Attribution« zufolge, eines Zusammenschlusses von Klimaforschern weltweit, hat der Klimawandel diesen Rekordregen um 15 Prozent intensiver oder dreimal so wahrscheinlich gemacht. Seine Antriebskraft zog Hurrikan Harvey aus der feuchtigkeitsbeladenen Luft über dem außergewöhnlich warmen Golf von Mexiko.

### Wasserdampf als Energiespeicher

In den feuchtheißen tropischen Regionen beiderseits des Äquators ist reichlich Wasserdampf in der Luft vorhanden. Von dort aus können die wasserreichen Luftmassen entlang von Sturmzugbahnen in die kühleren, trockeneren Regionen der mittleren bis höheren Breiten gelangen und diesen starke, anhaltende Niederschläge bringen. Die feuchtwarmen Strömungen verteilen die Energie in der Erdatmosphäre gleichmäßiger und entfesseln unterwegs heftige Dunststürme.

Wenn wir in der Sonne schwitzen oder Wasser in einem Topf zum Kochen bringen, verwandeln wir flüssiges Wasser in Wasserdampf. Voraussetzung dafür ist Hitze. Ein vergleichbarer Vorgang spielt sich im Klimasystem ab, wenn

Wasser aus feuchten Böden, Pflanzen, Ozeanen, Seen und Flüssen durch Erwärmung verdunstet und als Dampf in die Luft gelangt. Die Verdunstung des Wassers benötigt Energie; sofern sich der Dampf später durch Kondensation, also Wolken- oder Taubildung, wieder in flüssiges Wasser verwandelt, wird diese Energie in Form von Wärme frei und erhöht die Temperatur der Atmosphäre. Die daraus resultierende Warmluftblase ist leichter als die Umgebungsluft und steigt daher auf. Da die Temperaturen in größeren Höhen in der Regel niedriger sind, kann die Blase immer weiter steigen und wachsen, so dass weiterer Wasserdampf kondensiert, Wolken bildet und noch mehr Wärme freisetzt. Wer schon einmal in einem Flugzeug durch eine große Quellwolke geflogen ist, hat die Turbulenzen gespürt, die solche aufsteigenden Luftmassen erzeugen.

Die im Wasserdampf gespeicherte Verdunstungsenergie – genannt »latente Wärme« – ist der bedeutendste Antriebsfaktor für Hurrikane, Gewitter und ganz gewöhnliche Schlechtwetterperioden. Weil für die Verdampfung von Wasser viel Energie aufgewendet wird, enthält Wasserdampf ein beträchtliches Ausmaß an latenter Wärme. Ein typischer Hurrikan setzt an einem Tag so viel Wärmeenergie frei, wie in 200 Tagen weltweit an Stromenergie erzeugt wird. Alle 20 Minuten kann er die Explosionskraft einer zehn Megatonnen schweren Atombombe entfesseln.

Besonders bedrohlich kann die Wasserdampfunahme in der Atmosphäre werden, weil sie tropische Stürme rasch anschwellen lässt. Meteorologinnen und Meteorologen sprechen von einem sich rasant intensivierenden Sturm, wenn innerhalb von 24 Stunden entweder die maximale

Windgeschwindigkeit um mindestens 30 Knoten (etwa 56 Stundenkilometer) zunimmt oder der Luftdruck im Zentrum des Sturms um mindestens 42 Millibar fällt. Heute treten solche Stürme etwa fünfmal so häufig auf wie vor 40 Jahren. Allein 2020 trafen diese Kriterien im Atlantik auf zehn Hurrikane zu. 2021 erfuhren fünf der sechs Hurrikane, die sich bis Mitte September im Atlantik bildeten, eine rasante Verstärkung, darunter Ida und Nicholas. Jüngere Studien liefern die Bestätigung: Eine rasche Intensivierung wird wahrscheinlicher, je stärker sich die Ozeane erwärmen. Durch die Aufheizung der Meere verdunstet mehr Wasser, so dass zusätzliche Verdunstungswärme in die Atmosphäre befördert wird. Ozeane nehmen etwa 90 Prozent der Wärme auf, die in den durch die Menschen ausgestoßenen Treibhausgasen gespeichert ist (siehe »Warum ist Wasserdampf ein Treibhausgas?«). Daher steigen die Meerestemperaturen, sowohl an der Oberfläche als auch in größeren Tiefen. Das warme Wasser wirkt wie eine starke Batterie, aus der Stürme Energie ziehen.

### Gefährlich schwüle Sommernächte

Unter den vielen Folgen des Klimawandels hat jedoch nicht nur die Wasserdampfzunahme Einfluss auf tropische Stürme. Reduzierte vertikale Windscherungen, das sind scharfe Änderungen der Windgeschwindigkeit oder Windrichtung zwischen übereinanderliegenden Luftmassen, begünstigen ebenfalls die Entwicklung von Stürmen, da aufsteigende Wolkentürme seltener auseinandergerissen werden. Darüber hinaus untersuchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler derzeit, wie es sich auswirkt, wenn sich die Anteil-

## Warum ist Wasserdampf ein Treibhausgas?

Jedes Molekül in der Atmosphäre, das Infrarotstrahlung absorbiert, wirkt als Treibhausgas: Es speichert die von der Erde abgestrahlte Energie in Form von Molekülschwingungen. Dadurch entweicht sie nicht in den Weltraum, sondern verbleibt in der Atmosphäre, wodurch sich diese aufheizt.

Bei einer Molekülschwingung ändern sich entweder Bindungswinkel oder Bindungslängen periodisch – als wären die Atome Kugeln, die durch Federn miteinander verbunden sind. Der Schwerpunkt des Moleküls bleibt dabei stets erhalten, es bewegt sich durch die Schwingung also nicht in eine Richtung. Jede Schwingungsart (man spricht von Schwingungsmoden) benötigt ein spezifisches Maß

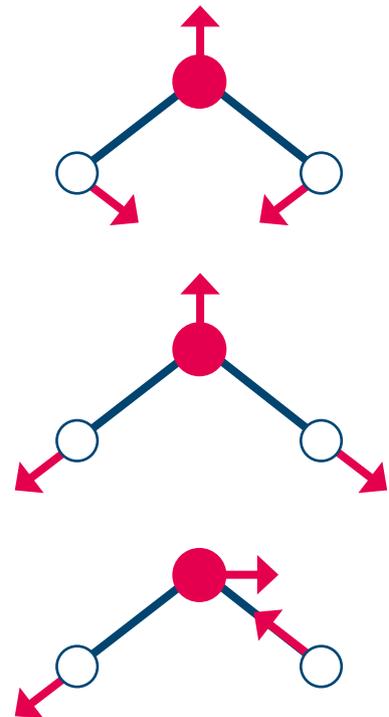
an Energie, um angeregt zu werden, sprich Strahlung einer entsprechenden Wellenlänge.

Das Wassermolekül besitzt drei Schwingungsmoden (rechts; weiß: Wasserstoff, rot: Sauerstoff):

Ändert sich der Bindungswinkel des Moleküls, spricht man von der H–O–H-Deformationsschwingung (oben).

Bei der symmetrischen O–H-Streckschwingung (Mitte) verlängern und verkürzen sich die Bindungen zwischen Sauerstoff und den beiden Wasserstoffatomen synchron.

Im Gegensatz dazu ändern sich die Längen dieser Bindungen bei der antisymmetrischen O–H-Streckschwingung (unten) immer entgegengesetzt.



le von Staub und Schmutzpartikeln in der Luft verändern und welche Rolle die unterschiedliche Erwärmung der unteren und oberen Luftschichten spielt, die die Aufstiegs- geschwindigkeit von Warmluftblasen regelt.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten waren große Bereiche des tropischen Nordatlantiks ungewöhnlich warm, wodurch übermäßig viel Wasser verdunstet ist. Die hohe Luftfeuchtigkeit fungierte als Motor für starke Hurrikane. Ebenso speisen sich außertropische Stürme aus dem zusätzlichen Wasserdampf und der hinzukommenden Energie, weshalb Starkregenereignisse und vielleicht sogar heftigere Schneefälle häufiger auftreten.

Die Wasserdampfzunahme bringt aber nicht nur eine erhöhte Sturmgefahr mit sich. Sie macht auch Sommer- nachte unangenehm schwülwarm. Über den Landflächen weltweit sind seit Mitte der 1990er Jahre die nächtlichen Tiefsttemperaturen im Sommer stärker gestiegen als die Tageshöchsttemperaturen. Das liegt ebenfalls am Treib- hausgas Wasserdampf: Wärme, die normalerweise nachts in den Weltraum entweichen würde, bleibt in der Atmo- sphäre gefangen und verhindert, dass die Erdoberfläche abkühlt. Und im Gegensatz zu Kohlenstoffdioxid, das sich über den ganzen Globus verteilt, egal wo es freigesetzt wird, bleibt Wasserdampf zunächst dort, wo er entsteht.

Die erhöhte Luftfeuchtigkeit macht heiße Nächte zum Gesundheitsrisiko. Weil die Luft mehr Wasserdampf ent- hält, verdunstet Schweiß schlechter, was die natürliche Abkühlung des Körpers erschwert. Überhitzung und Schlaf-

**DIE AHR bei Bad-Neuenahr-Ahrweiler einige Mo- nate nach der Flutkatastrophe im Sommer 2021. In ihrem Einzugsgebiet fiel am 14. Juli mehr Regen als sonst im ganzen Monat.**

störungen sind die Folge. Ein Maß für diese Beschwerden ist der Hitzeindex: Er beschreibt den kombinierten Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit und beziffert den Stress, dem der Körper tatsächlich ausgesetzt ist. 33 Grad Celsius bei 60 Prozent Luftfeuchtigkeit ergeben beispielsweise einen Hitzeindex von 40 Grad Celsius. Ein Hitzeindex von mehr als 38 Grad Celsius gilt als gefährlich. Längere Expo- sition kann tödlich sein, speziell für ältere Menschen und Kinder. Vieh und Haustiere leiden ebenfalls unter nächtli- cher Hitze, während Wildtiere in höhere Breiten oder höher gelegene Gegenden ausweichen. Kühlt es nachts weniger ab, kann sich Hitze überdies in Böden anstauen, so dass manche Pflanzen und Insekten sterben, andere – wärme- liebendere Arten – vielleicht besser gedeihen. Gemäß der »Declaration on Climate Change and Health«, die 32 US- amerikanische Gesundheitsorganisationen im August 2021 veröffentlicht haben, steigt durch Nachthitze außerdem die Gefahr durch von Insekten übertragenen Krankheiten.

### **Rückkopplung verstärkt den Temperaturanstieg**

Die Belastung durch hohe Nachttemperaturen nimmt nicht nur in den heißen tropischen Regionen zu, sondern eben- falls in Gebieten deutlich nördlich oder südlich des Äqua- tors. In Houston in den USA liegt die Durchschnittstempe- ratur heute um mehr als zwei Grad Celsius höher als 1970. Ursächlich sind zum einen die Nähe des wärmer gewor- denen Golfs von Mexiko, zum anderen das rasche Wachstum der Stadt, das den urbanen Wärmeinseleffekt erhöht.

Das deckt sich mit den Entwicklungen in Deutschland: Die Zahl der »Tropennächte«, in denen die Temperatur nicht unter 20 Grad Celsius sinkt, hat seit den 1990er Jahren immer mehr zugenommen. In Hessen wurde beispielsweise zwischen 1961 und 1990 etwa alle fünf Jahre eine solch warme Nacht registriert. In Frankfurt am Main zählte der



Deutscher Wetterdienst im Jahr 2015 acht, im Jahr 2018 sechs und im Jahr 2019 vier Tropennächte. Künftig werden diese Zustände vermutlich zur Normalität.

Am meisten werden allerdings einige tropische Länder leiden – oder tun es schon jetzt. Im Mai 2015 wurden Indien und Pakistan von einer starken Hitzewelle erfasst. Die Tageshöchsttemperaturen lagen dort tagelang über 46 Grad Celsius, durch die hohe Luftfeuchtigkeit konnte es nachts kaum abkühlen. An den Folgen dieser Belastung starben nach Angaben der Vereinten Nationen rund 3500 Menschen. Wenn die globale Erwärmung um ein weiteres halbes Grad zulegt, wird sich die Zahl der durch Extremhitze gefährdeten Menschen weltweit auf 500 Millionen erhöhen, schätzten Klimawissenschaftler der Rutgers University in den USA im Jahr 2020.

Im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung erfährt Kohlenstoffdioxid zwar die meiste Beachtung, doch Wasserdampf ist das bei Weitem wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre. Er absorbiert viel größere Anteile der von der Erdoberfläche emittierten Infrarotstrahlung als andere Treibhausgase und fängt dadurch mehr Wärme ab. Das ist aber noch nicht alles, denn da wärmere Luft mehr Wasser aufnehmen kann – der Wasserdampfgehalt also mit steigender Temperatur zunimmt –, verstärkt er jede durch Kohlenstoffdioxid oder andere Treibhausgase verursachte Erwärmung zusätzlich. Um die Größenordnung zu veranschaulichen: Eine Verdopplung der atmosphärischen Konzentration von Kohlenstoffdioxid würde für sich betrachtet die Erde um etwa ein Grad Celsius aufheizen. Durch Rückkopplungen ist der Temperaturanstieg aber doppelt so hoch. Allerdings erhalten andere Feedbacks wie etwa schwindendes Meereis den Großteil der Aufmerksamkeiten. Dabei ist die Wasserdampfrückkopplung – Erwärmung führt zu Verdunstung, wodurch Wärme eingefangen wird, die weitere Erwärmung verursacht – die stärkste im Klimasystem.

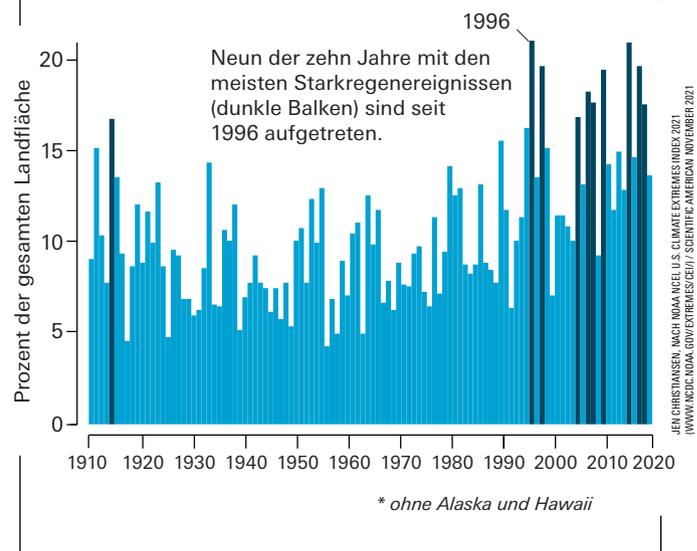
Entgegen dem, was man zunächst vermuten würde, ist die Wasserdampfrückkopplung dort am schwächsten, wo besonders viel Wasserdampf vorhanden ist. In feuchten Regionen ist die vom Wasserdampf absorbierte Infrarotstrahlung bereits nahe an ihrem physikalischen Limit, weshalb es sich nur noch minimal auswirkt, wenn noch weitere Feuchtigkeit hinzukommt. An trockenen Orten jedoch, etwa in Polargebieten und Wüsten, liegt die Menge an absorbierter Infrarotstrahlung deutlich unter ihrem potenziellen Maximum (siehe »Luftfeuchtigkeit ist relativ«). Daher wird jeglicher hinzukommender Wasserdampf zusätzliche Wärme abfangen und die untere Atmosphäre aufheizen.

Die zunehmende Zahl und Dauer arktischer Hitzewellen ist ein eindeutiges Symptom für häufigeren und anhaltenderen Eintrag warmer, feuchter Luftmassen, die von den Tropen kommend nordwärts ziehen. Im Januar 2021 etwa stiegen die Temperaturen dort sprunghaft an. In weiten Teilen des Nordpolarmeers war es rund 20 Grad Celsius wärmer als üblicherweise. Die immer häufiger selbst im Winter in der Arktis auftretenden Wärmeperioden verzögern die Meereisbildung und tragen dazu bei, dass die Eisdecke rasch schrumpft.

## Regen wird heftiger

Extremere Regen- und Schneefälle kommen häufiger vor, je mehr Wasserdampf durch die Erwärmung von Luft und Ozeanen in die Atmosphäre gelangt. Ein Sturm gilt als »extrem«, wenn er allein mehr Niederschlag erzeugt als 90 Prozent der Stürme im ganzen Jahr. In den letzten Jahrzehnten haben sich solche Ereignisse in vielen städtischen wie auch ländlichen Gebieten vervielfacht.

Prozent der Landfläche der USA\*, wo extreme Tagesniederschläge (Regen oder Schnee) deutlich überdurchschnittlich zum Jahresniederschlag beigetragen haben

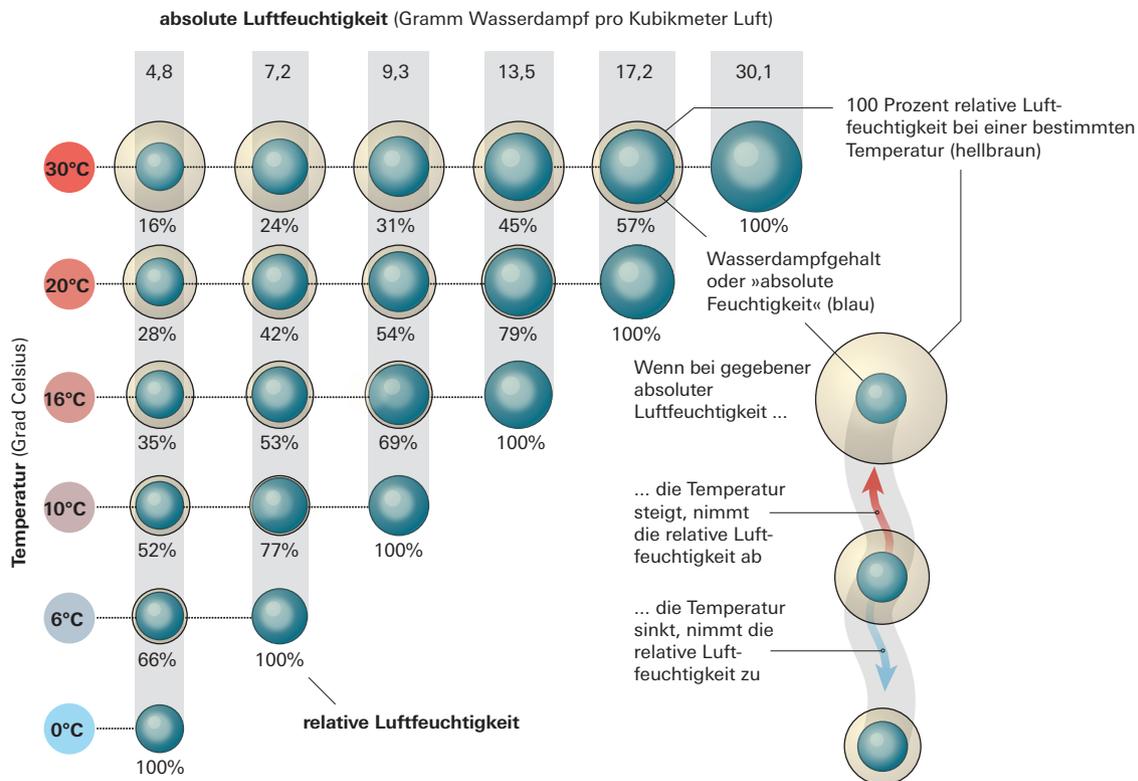


Verstärkte Wolkenbildung könnte die Erwärmung, die durch mehr Wasserdampf in der Atmosphäre zu Stande kommt, kompensieren. Wolken reflektieren die Sonneneinstrahlung und sorgen dadurch für Abkühlung, andererseits fangen sie Infrarotstrahlung ein und halten so Wärme fest. Über Ozeanen herrscht eher der kühlende Einfluss vor, während in höheren Breiten der wärmende Effekt überwiegt. Wie jüngste Untersuchungen nahelegen, hat im weltweiten Durchschnitt die Erwärmung größere Bedeutung, wodurch sich ein weiterer Teufelskreis ergeben würde, an dem Wasserdampf beteiligt ist.

Da unsere menschlichen Aktivitäten weiterhin Treibhausgase freisetzen, wird die Erwärmung von Ozeanen und Atmosphäre voranschreiten. Durch Verdunstung wird also zusätzlicher Wasserdampf entstehen, wodurch Dunststürme, belastende Schwüleperioden, Hurrikane der stärksten Kategorien sowie sich rasch intensivierende Stürme häufiger auftreten. Solche Extremwetterereignisse vorauszusagen wird zur Herausforderung für die Meteorologie: Wenn sich Stürme erst kurz vor ihrem Landfall verstärken, wie etwa Hurrikan Ida, bleibt wenig Zeit, um Katastrophenalarm auszurufen. Eventuelle Evakuierungen müssten dann innerhalb weniger Stunden erfolgen.

## Luftfeuchtigkeit ist relativ

Ob sich die Luft an einem bestimmten Tag feucht oder trocken anfühlt, hängt von der relativen Luftfeuchtigkeit ab. Warme Luft kann dabei mehr Wasserdampf aufnehmen als kalte: Steigt die Temperatur um 1 Grad Celsius, sind 7 Prozent mehr Wasserdampf möglich. So beträgt der maximal mögliche Gehalt des Wasserdampfs in der Luft bei 0 Grad Celsius 0,6 Prozent, bei 30 Grad Celsius hingegen können bis zu 4,2 Prozent in der Luft vorhanden sein. Man spricht von 100 Prozent Luftfeuchtigkeit, wenn die Luft bei einer bestimmten Temperatur die maximale Menge an Wasserdampf enthält, die sie zu speichern in der Lage ist. Ändern sich die Temperatur oder der Wasserdampfgehalt, hat das die verschiedensten Auswirkungen.



Vor allem fehlen für die Vorhersage solcher Extremstürme Temperaturmessungen unter der Meeresoberfläche. Eine in größere Tiefen reichende Warmwasserschicht liefert wesentlich mehr Treibstoff für Stürme als eine flache, doch Satelliten messen nur die Oberflächentemperaturen der Ozeane. Demgegenüber versuchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler herauszufinden, wie viel Energie in den oberen etwa 100 Metern des Meerwassers gespeichert ist, denn aus diesen Tiefen speisen sich die Stürme. Autonome Ozeangleiter – segelflugzeugartige Roboter – zeichnen in den oberen Wasserschichten der Ozeane in unterschiedlichen Tiefen Temperatur und Salzgehalt auf. Die Forschung arbeitet außerdem mit Satellitendaten, um Schwankungen des Meeresspiegels zu ermitteln: Eine tief reichende Warmwasserschicht dehnt sich relativ zur Umgebung aus, wodurch sich die Ozeanoberfläche wölbt. Dieser »Hügel« ist vom Weltraum aus sichtbar.

Satellitendaten sind außerordentlich wertvoll, aber wir benötigen zusätzlich über die Ozeane verteilte Instrumente, die Temperatur, Wasserdampf und Wind messen. Wir werden uns weiterhin auf Hurrikanjäger verlassen – auf Flugzeuge, die in Stürme hineinfliegen, um darin Messungen vorzunehmen. Die dabei gewonnenen Daten fließen in Computermodelle ein. Diese liefern genauere Informationen über den Zustand der Atmosphäre und die Stärke eines Sturms. Mehr Datenabdeckung, schnellere Computer und ein tiefer gehendes Verständnis der Entstehung von Stürmen helfen Vorhersagen zu verbessern.

Wasserdampf entstammt zahllosen Quellen und beeinflusst viele Vorgänge in der Atmosphäre. Einige der Wechselwirkungen versteht die Wissenschaft noch nicht vollständig. Es wird eine anspruchsvolle Aufgabe sein, mit Hilfe von Computermodellen vorherzusagen, welche Rolle Wasserdampf in einem sich wandelnden Klimasystem



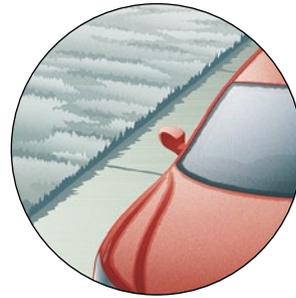
### Wolken

Wasserdampf an sich sehen wir nicht. Gelangt jedoch mehr Wasser in die Luft, wenn die relative Luftfeuchtigkeit bereits bei 100 Prozent liegt, bildet sich eine Wolke. Vereinfacht gesagt, sind Wolken also der überschüssige Wasserdampf, den die Luft nicht mehr aufnehmen kann. Er kondensiert zu kleinen Wassertröpfchen – die wir sehen. Umgekehrt bilden sich ebenfalls Wolken, wenn Luft mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 Prozent abkühlt. Wolken entstehen in vielen Situationen: etwa, wenn kalte Luft mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von weniger als 100 Prozent vom trockenen Land aus über den Ozean weht. Dort steigt Wasser durch Verdunstung auf und hebt die relative Luftfeuchtigkeit an.



### Nebel

Nebel ist eine Wolke, die auf einer Land- oder Wasseroberfläche aufsitzt. Weht warme Luft über eine kühlere Gegend, kondensiert der Dampf, und Nebel bildet sich. Ebenso entstehen Wolken oder Nebel, wenn warme Luft in höhere, kühlere Lagen aufsteigt, etwa an Berghängen. Und wenn die Luft nach einem warmen Tag nachts abkühlt, liegt am nächsten Tag Morgennebel über Feldern und Tälern.



### Tau und Reif

In klaren Nächten können durch Wärmeabstrahlung Tau oder Reif entstehen. Das liegt daran, dass Oberflächen Infrarotwärme schneller abgeben als die Luft und dadurch rascher abkühlen. Trifft der in der Luft befindliche Wasserdampf auf eine kühlere Oberfläche, kondensiert er. Dann sehen wir kleine Tröpfchen auf der Rasenoberfläche – oder müssen Eis von der Windschutzscheibe kratzen, wenn es entsprechend kalt ist.



### Unser Atem

Beim Ausatmen pusten wir Wasserdampf in die Luft. Wird dadurch die relative Luftfeuchtigkeit von 100 Prozent überschritten, bildet sich vorübergehend eine kleine Wolke, die sich rasch wieder auflöst, sobald die winzigen Tröpfchen verdampfen. Weil kühlere Luft weniger Wasserdampf aufnehmen kann, sehen wir unseren Atem an kälteren Tagen.

NICK BOCKELMAN / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2021

spielt. Selbst bei der scheinbar unkomplizierten Ermittlung der Verdunstungsgeschwindigkeit von Wasser aus einem Ozean oder See sind viele Faktoren zu berücksichtigen, etwa die Differenz zwischen Wasser- und Lufttemperatur, die bereits in der Luft vorhandene Wasserdampfmenge und die Windgeschwindigkeit. Über Landflächen wird die Berechnung noch kniffliger, denn dabei kommen zusätzliche Variablen wie die Feuchtigkeitsmenge im Boden und die Vegetation ins Spiel. Schwierig wird auch die Prognose, wie sich der Wasserdampf nach seinem Eintritt in die Atmosphäre verhält. So könnte er etwa Wolken bilden, einen Sturm auslösen oder als Regen und Schnee fallen. Oder wird er an Oberflächen als Tau oder Frost kondensieren? Wird er über hunderte oder gar tausende Kilometer von den Tropen in höhere Breiten strömen? Fehler bei jeder dieser Berechnungen erschweren die Vorhersagen künftiger Temperaturveränderungen und Wettermuster.

Die Wasserdampfzunahme in unserer Atmosphäre verdient mehr Beachtung. Leider können wir seinen Gehalt nicht direkt beeinflussen. Wir können ihn jedoch indirekt reduzieren, indem wir die Erwärmung zügeln. Sollte uns das gelingen, dürften sich Dampfstürme künftig weniger intensivieren – und ebenso die durch sie verursachten Probleme. ◀

### QUELLEN

**Kiehl, J. T. und Trenberth, K. E.:** Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 1997

**Knutti, R., Hegerl, G. C.:** The equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation changes. *Nature Geoscience* 1, 2008

**Van Oldenborgh, G. J. et al.:** Attribution of extreme rainfall from Hurricane Harvey, August 2017. *Environmental Research Letters* 12, 2017

### WEBLINK

[www.spektrum.de/news/1897198](http://www.spektrum.de/news/1897198)

*Wie findet man heraus, ob ein Wetterereignis eine Folge des Klimawandels ist? Interview mit dem Klimaforscher Reto Knutti.*

### Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



VALDEZRL / GETTY IMAGES / ISTOCK

# CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN FRUCHTIGER EXPERIMENTIERKASTEN

**Orangen sind Multitalente: Ihre Inhaltsstoffe bringen rostige Nägel wieder zum Glänzen, sorgen für spannende Farbspiele – und haben eine überraschende Wirkung auf Luftballons.**



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

» [spektrum.de/artikel/1989109](https://spektrum.de/artikel/1989109)

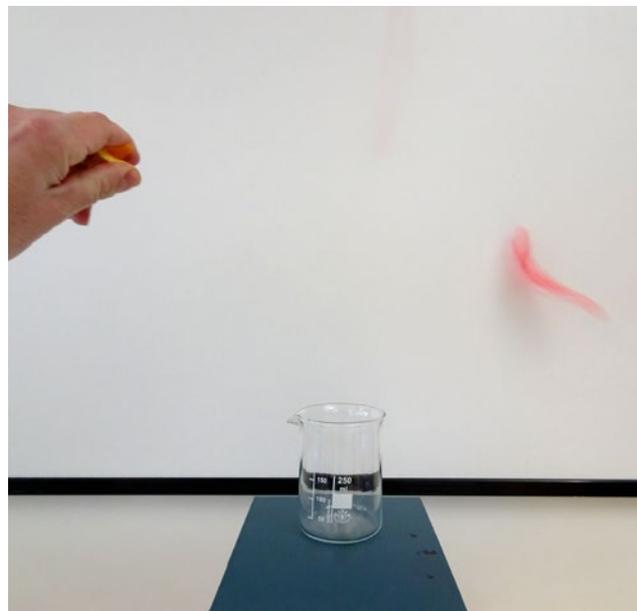
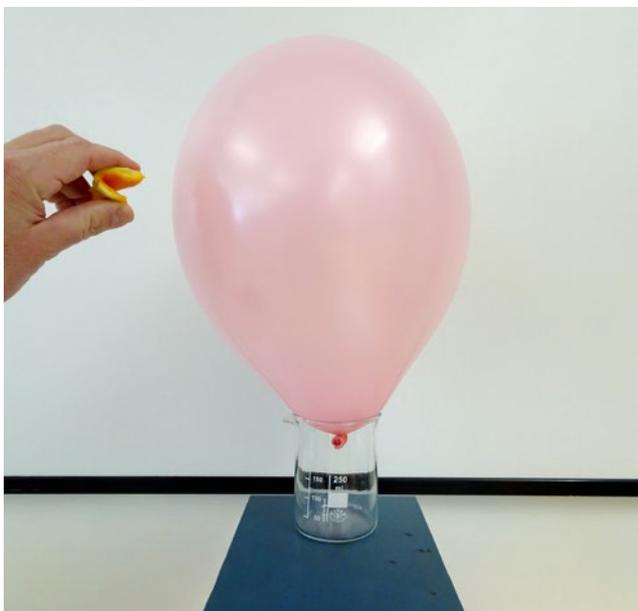
► Luftballons und Orangen vertragen sich nicht, wie Sie mit einem spektakulären Experiment nachprüfen können: Schneiden Sie ein Stück Schale aus einer Orange heraus und halten Sie es etwa fünf Zentimeter von einem aufgeblasenen Luftballon entfernt – die Außenseite der Schale muss zum Ballon zeigen. Drücken Sie. Nach etwa einer Sekunde zerplatzt der Ballon mit einem lauten Knall!

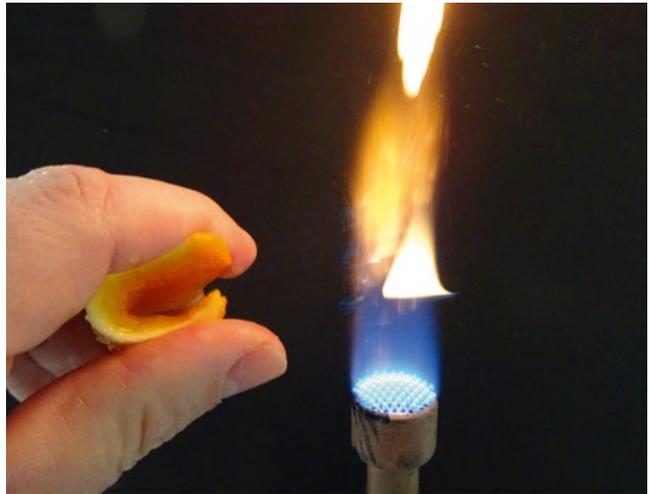
Offensichtlich ist dafür die aus der Schale herausspritzende Flüssigkeit verantwortlich. Darin findet sich eine

**PENG! Ein aufgeblasener Luftballon zerplatzt, wenn der Saft einer Orangenschale auf seine Oberfläche trifft.**

Vielzahl chemischer Verbindungen, beispielsweise verschiedene ätherische Öle. So nennt man Stoffgemische organischer Substanzen, die flüchtig und häufig leicht entzündlich sind. Besonders eindrucksvoll tritt diese Eigenschaft zu Tage, wenn man die Flüssigkeit in der Orangenschale in eine nichtleuchtende Bunsenbrennerflamme oder Kerze spritzt. Es zeigen sich beeindruckende Flammerscheinungen (siehe »Feurig«).

Orangenöl besteht unter anderem aus einem Gemisch von Terpenen. Zu dieser Gruppe gehören sehr viele organische Verbindungen, die vor allem als sekundäre Inhaltsstoffe in Pflanzen vorkommen. Formal sind Terpene aus Einheiten von Isopren aufgebaut, einem verzweigten Kohlenwasserstoff mit fünf Kohlenstoffatomen.

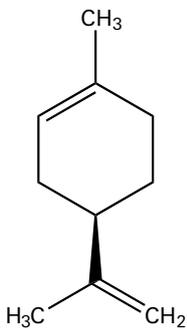
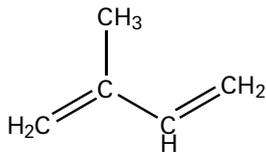




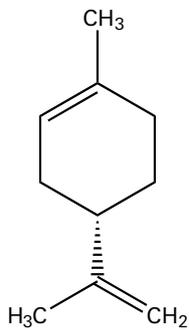
MATTHIAS DUCI

**FEURIG** Die ätherischen Öle der Orange sind leicht entzündlich.

**GRUNDBAUSTEIN** Alle Terpene sind formal aus mehreren Einheiten von Isopren (systematischer Name: Methylbuta-1,3-dien) aufgebaut.



R-(+)-Limonen



S-(-)-Limonen

**LIMONEN** existiert in zwei spiegelbildlichen Formen, so genannten Enantiomeren.

Von allen Zitrusfrüchten enthält die Orange den höchsten Anteil an dem Monoterpen Limonen. Monoterpene haben ein Grundgerüst von zehn Kohlenstoffatomen, bestehen also aus zwei Isopreneinheiten. Vom Limonemolekül existieren zwei Varianten (Isomere), die spiegelbildlich zueinander aufgebaut, aber nicht identisch sind – man bezeichnet sie als Enantiomere. Die in der Orangenschale vorkommende Verbindung ist das so genannte (R)-(+)-Limonen. Es hat einen zitrusartigen Duft, während sein Spiegelbild nach Terpentin riecht. Außerdem enthält Orangenöl die Monoterpene  $\beta$ -Myrcen, Sabinen,  $\alpha$ -Pinen, Linalool und Citral. Gemeinsam tragen sie zum komplexen, charakteristischen Orangengeruch bei. Vor allem aber dienen die verschiedenen ätherischen Öle dazu, Schädlinge abzuwehren und Insekten zur Bestäubung anzulocken.

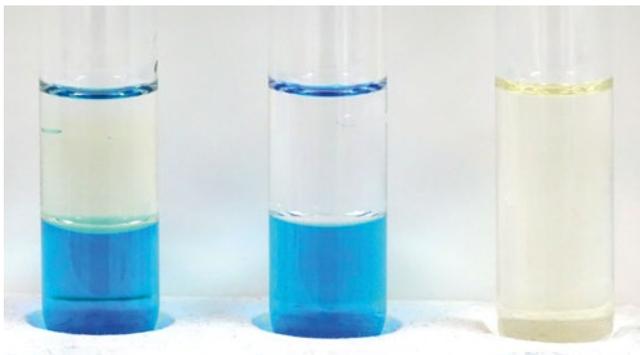
Will man temperaturempfindliche Stoffe wie das Orangenöl aus der Schale extrahieren, eignet sich besonders die Wasserdampfdestillation. Dem Trennverfahren liegt das Prinzip zu Grunde, dass sich die ätherischen Öle in Wasserdampf geringfügig lösen und daher bei der Destillation mitgerissen werden können. Im Bild »Versuchsaufbau« sieht man, wie das Experiment in der Praxis funktioniert: In einem Kupferkessel (links im Bild) wird Wasser zu Dampf erhitzt. Dieser steigt auf und strömt durch ein Gemisch aus Orangenschalen und heißem Wasser (Glaskolben in der Mitte der Apparatur). Das hieraus aufsteigende Dampfgemisch kondensiert in dem angeschlossenen Wasserkühler und sammelt sich im rechten Kolben. Das Destillat riecht intensiv nach Orange und erscheint trüb. Limonen und die anderen Terpene



VERSUCHSAUFBAU zur Wasserdampfdestillation.

MATTHIAS BUDICI

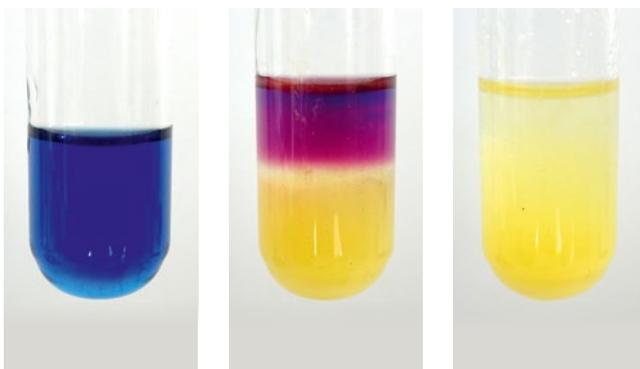
MATTHIAS BUDICI



**GLEICHES LIEBT GLEICHES** Gemische aus Wasser und Limonen (links), Wasser und Speiseöl (Mitte) sowie Limonen und Speiseöl (rechts). Die wässrigen Phasen sind mit Methylenblau angefärbt.

**VITAMIN-C-NACHWEIS** Tillmans-Reagenz (links), unterschichtet mit Orangensaft (Mitte), das Gemisch nach dem Schütteln (rechts).

MATTHIAS BUDICI

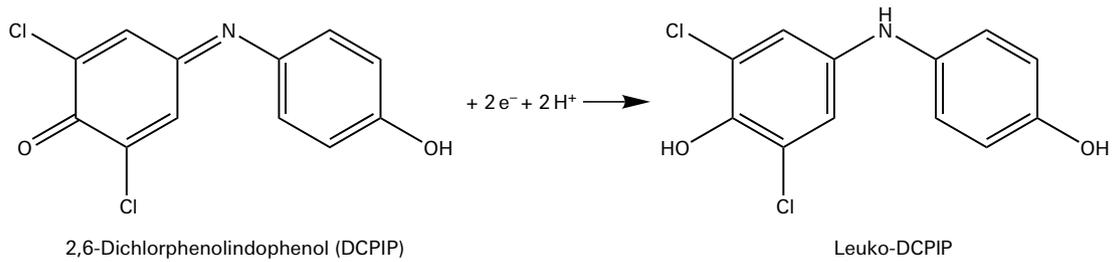
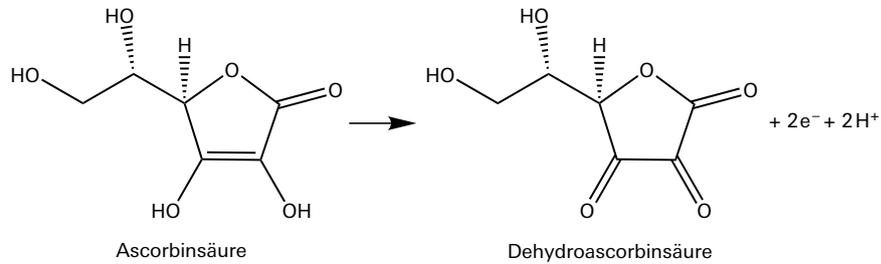


lösen sich nämlich kaum in Wasser: Sie sind hydrophob (griechisch: Wasser meidend). Im Destillat liegen sie daher fein verteilt als Tröpfchen vor, es handelt sich also um eine Emulsion.

Gut lösen sich die Terpene hingegen in fetthaltigen Flüssigkeiten wie Speiseöl: Sie sind lipophil (Fett liebend). Um das exemplarisch am Limonen zu zeigen, gibt man in zwei Reagenzgläser je einige Milliliter Wasser und anschließend in das erste einige Milliliter Limonen, in das zweite einige Milliliter Speiseöl. In ein drittes füllt man auf diese Weise Limonen und Speiseöl. Während sich in den ersten beiden Reagenzgläsern zwei Phasen ausbilden, erhält man im dritten eine einheitlich erscheinende (homogene) Mischung (»Gleiches liebt Gleiches«). Das Ergebnis bestätigt, dass Limonen hydrophob ist, sich jedoch in Speiseöl löst und somit lipophil ist.

Die Fett liebende Eigenschaft von Limonen nutzt man in einigen Reinigungsmitteln. So ist etwa auf dem Etikett des Orangen-Universalreinigers der Marke Frosch zu lesen: »Stark gegen Fett und Schmutz mit Fettlösern aus der Orangenschale«. Auf verschiedenen Blogs gibt es Anleitungen, wie sich unter Verwendung von Orangenöl Putzmittel selbst herstellen lassen. Beispielsweise kann man Orangenschalen über zwei bis drei Wochen in verdünnter Essigessenz (1 Teil Essigessenz und 4 Teile Wasser) lagern. Dabei werden die ätherischen Öle herausgelöst – und fertig ist der Essigreiniger mit Fettlösekraft. Verwendet man statt Orangenschalen gekauftes Orangenöl, ist unbedingt auf eine entsprechende Verdünnung zu achten, denn die Inhaltsstoffe sind alles andere als harmlos. Allein

**REDOXPROZESSE  
bei der Reaktion  
von Ascorbinsäure  
mit DCPIP.**



schon Limonen reizt die Haut, kann allergische Hautreaktionen hervorrufen und ist sehr giftig für Wasserorganismen, und das sogar langfristig.

Und warum platzt nun der Luftballon im eingangs geschilderten Experiment? Luftballons bestehen aus großen organischen Molekülen (sind sie aus Naturkautschuk, sind es Polyterpene; bei solchen aus synthetischem Kautschuk handelt es sich um ein Polymer aus Styrol und Butadien). Diese lösen sich in Limonen. Trifft die Flüssigkeit aus der Orangenschale auf den Ballon, wird seine Haut dünner und es entstehen sogar mitunter kleinste Löcher, so dass er platzt.

Doch nicht nur die Schale der Orange, auch ihr Inneres eignet sich für Laborversuche. Bekanntermaßen sind die

Früchte wahre Vitaminbomben: 100 Gramm Fruchtfleisch enthalten zirka 50 Milligramm Vitamin C. So bezeichnet man die L-(+)-Ascorbinsäure und ihre Derivate mit gleicher Wirkung.

Vitamin C ist recht leicht durch die Entfärbung einer blauen Lösung namens Tillmans-Reagenz nachzuweisen (2,6-Dichlorphenolindophenol, kurz DCPIP, siehe »Redoxprozesse«). Unterschichtet man in einem Reagenzglas einige Milliliter davon mit etwas Orangensaft, so färbt sich die darüberliegende DCPIP-Lösung zunächst rot. Das liegt daran, dass Orangensaft sauer ist und DCPIP als Indikator fungiert. Wird das Gemisch geschüttelt, entfärbt sich das rote Reagenz (siehe »Vitamin-C-Nachweis«).

Beim Schütteln reagiert Ascorbinsäure mit DCPIP zu Dehydroascorbinsäure und dem farblosen Leuko-DCPIP. Wenn man die zwei Teilgleichungen dieser Gesamtreaktion betrachtet, wird eine wichtige Eigenschaft von Ascorbinsäure deutlich: Bei ihrer Umwandlung zu Dehydroascorbinsäure gibt sie pro Molekül zwei Elektronen

**SCHÖNHEITSKUR Rostige Eisennägel (links)  
sehen nach einem zweitägigen Bad in  
Orangensaft schon viel besser aus (rechts).**

MATTHIAS DRÜCK

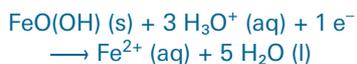




**FARBPALETTE Orangensaft reduziert Permanganationen unterschiedlich stark, je nach pH-Wert der umgebenden Lösung.**

ab, überträgt sie auf ein DCPIP-Molekül und wirkt somit als Reduktionsmittel (siehe »Redoxprozesse«).

Die reduzierende Wirkung der Ascorbinsäure nutzt man in Reinigungsmitteln zur Rostentfernung auf Fliesen und Steinböden. Auch korrodierte Metalle werden mit Hilfe einer Ascorbinsäure-Lösung wieder frisch – und ebenso mit Orangensaft. Links im Bild »Schönheitskur« sind einige rostige Eisennägel zu sehen. Das rechte Bild zeigt dieselben Nägel nach einem zweitägigen Bad in Orangensaft – mit deutlich weniger Rost. Hier spielen zwei Faktoren zusammen: Der saure Charakter des Orangensafts löst den Rost, während die Ascorbinsäure Elektronen auf ihn überträgt und ihn dadurch reduziert. Rost ist ein Gemisch aus Eisenverbindungen. Wählt man exemplarisch die chemische Formel  $\text{FeO}(\text{OH})$ , lautet die Reaktion folgendermaßen (die Symbole »s«, »aq« und »l« stehen für »fest«, »in Wasser gelöst« sowie »flüssig«):



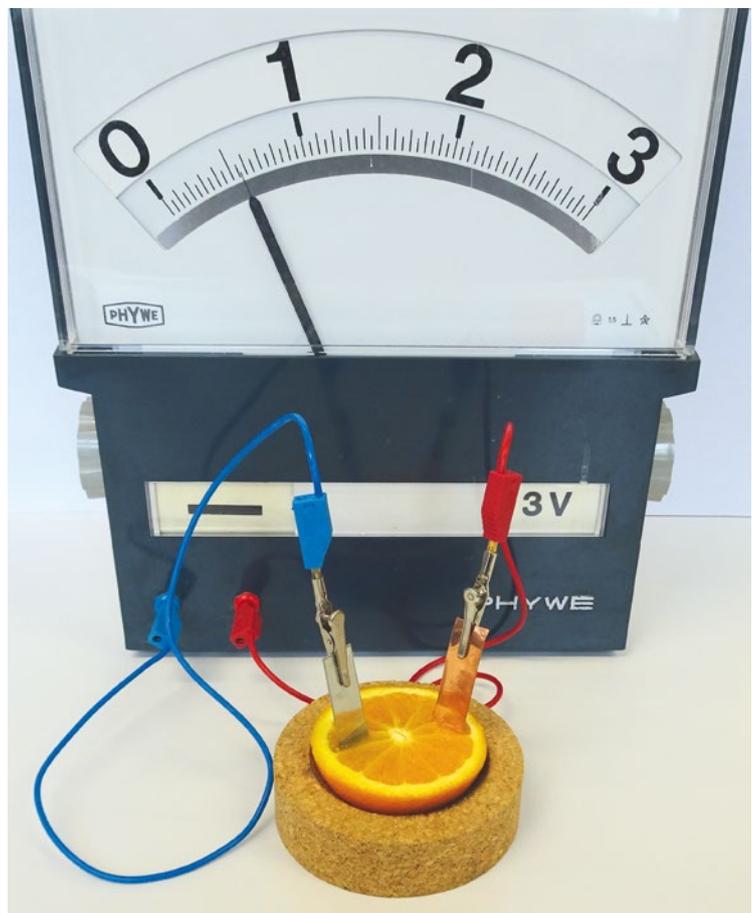
Rost (Eisen(III)-hydroxidoxid) + 3 Oxoniumionen + 1 Elektron  
 → Eisen(II)-ion + 5 Wassermoleküle

Ebenfalls dank der Ascorbinsäure gelingt mit Orangensaft ein schillerndes Farbexperiment. Dazu gibt man in drei Reagenzgläser je einen kleinen Kaliumpermanganat-Kristall. Im ersten löst man ihn in drei Milliliter Natronlauge (Konzentration 2 mol/Liter), im zweiten in drei Milliliter Wasser mit einer gelösten Spatelspitze Soda (um die Säure des Orangensafts abzupuffern) und im dritten in drei Milliliter Schwefelsäure (Konzentration 0,5 mol/Liter). Alle drei Flüssigkeiten sind jetzt violett und müssen durchscheinend sein (siehe »Farbpalette«, links). Nun gibt man in die ersten beiden Reagenzgläser je einen Tropfen Orangensaft, in das dritte fünf. Nach wenigen Sekunden erscheint die erste Lösung grün, die zweite färbt sich nach zirka zwei Minuten braun. Die Lösung im dritten Reagenzglas entfärbt sich.

Was ist passiert? Abhängig vom pH-Wert der umgebenden Lösung reduziert die Ascorbinsäure das dunkelviolette Permanganat ( $\text{MnO}_4^-$ ) zum grünen Manganat(VI)-ion ( $\text{MnO}_4^{2-}$ , alkalische Lösung), zum braunen Mangandioxid ( $\text{MnO}_2$ , neutrale Lösung) sowie zum blass rosafarbenen Mangan(II)-ion ( $\text{Mn}^{2+}$ , saure Lösung). Die Rosafärbung im dritten Reagenzglas ist nicht wahrnehmbar, weil die Konzentration an Mangan(II)-ionen dafür zu gering ist.

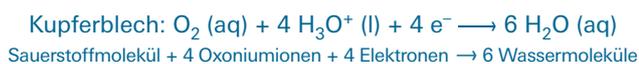
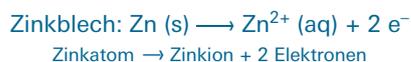
Im nächsten Versuch spielt die Orange eine tragende Rolle, ohne selbst direkt an der chemischen Reaktion teilzunehmen. Hierzu werden ein Zink- und ein Kupferblech in eine halbierte Orange gesteckt und die beiden Elektroden mittels Kabel über ein Voltmeter miteinander verbunden. Die beiden Bleche dürfen sich nicht berühren. Das Voltmeter zeigt eine Spannung von zirka 0,5 Volt an. Allerdings ist der Stromfluss zwischen den beiden Elektroden gering (je nach Elektrodenabstand zwischen 0,1 und

**POWERFRUCHT Die Orange als Batterie.**



0,3 Milliampere), so dass nur sehr empfindliche Verbraucher betrieben werden können.

Doch welche Strom liefernden Prozesse laufen dabei ab? Die Zinkelektrode ist der Minuspol (Anode) dieser »Fruchtbatterie«. Dort werden Zinkatome zu Zinkionen oxidiert. Die Elektronen fließen über den Verbraucher (oder das Amperemeter) zum Kupferblech (Pluspol, Kathode). Die Vorgänge dort werden häufig fehlerhaft beschrieben. Umfassende Untersuchungen haben gezeigt, dass die Reduktion des gelösten Luftsauerstoffs die Hauptreaktion ist. Mit chemischen Formeln lauten die Vorgänge an beiden Blechen wie folgt:

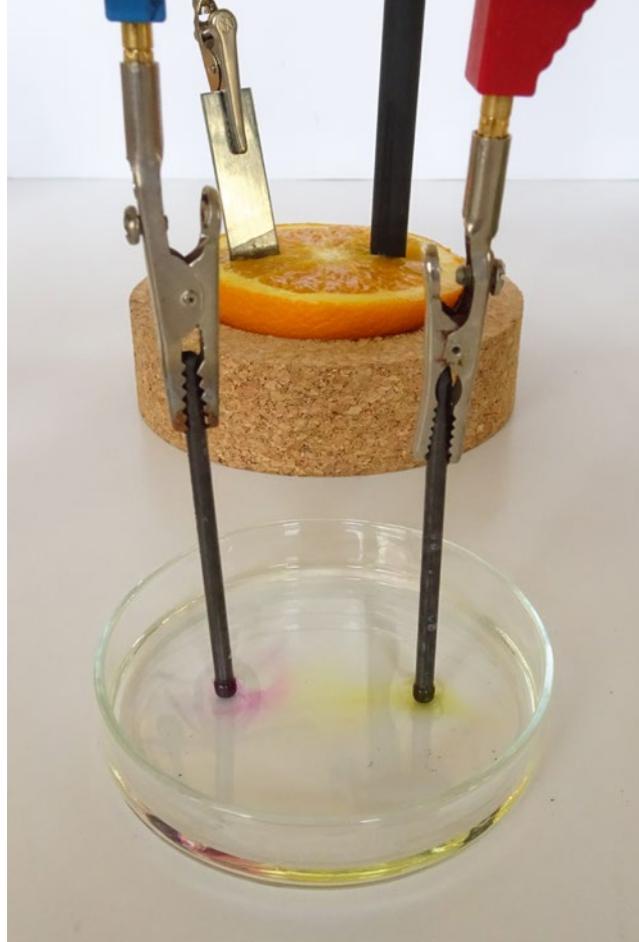


Und welche Rolle spielt die Orange? Sie – beziehungsweise ihr Fruchtsaft – dient als Elektrolyt-Lösung in diesem galvanischen Element: Wenn Strom fließt, wandern in ihr zum Ladungsausgleich positiv geladene Ionen (Kationen) zum Kupfer- und negativ geladene Ionen (Anionen) zum Zinkblech.

Mit dem Wissen, dass an der Kathode Sauerstoff reduziert wird, lässt sich nun die Versuchsanordnung optimieren. Ersetzt man das Kupferblech durch eine poröse Graphitelektrode, so erhöhen sich die Umsätze an den Elektroden enorm: Die Spannung beträgt dann zirka 0,9 Volt und die Stromstärke liegt zwischen 0,3 und 0,5 Milliampere. Das liegt daran, dass die Grenze zwischen den drei Phasen Elektrolyt, Elektrode und Luft an der neuen Elektrode viel größer ist und dadurch mehr Luftsauerstoff nachgeliefert wird. Bei dieser Anordnung ist es möglich, den Stromfluss durch einen »chemischen« Verbraucher sichtbar zu machen, und zwar durch Elektrolyse einer Kaliumiodid-Lösung. Bei einer Elektrolyse wird eine Redoxreaktion mit Hilfe von elektrischem Strom erzwungen. Zu diesem Zweck sticht man ein Zinkblech und eine Graphitelektrode in eine halbierte Orange und verbindet

### Orange oder Apfelsine?

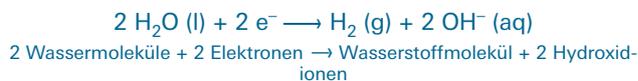
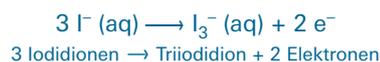
Vor allem in Norddeutschland wird die Orange als Apfelsine bezeichnet. Der Name verrät ihre Herkunft, denn als sie um 1700 über die Nordseehäfen Hamburg und Amsterdam erstmals in norddeutsche und niederländische Gebiete importiert wurde, nannte man die süße Frucht »Apel de Sina« oder »appelsina«, was »Apfel aus China« bedeutet. Das Wort Orange wiederum leitet sich aus dem altprovenzalischen Wort »auranja« ab, welches seine Wurzeln im Arabischen hat und ursprünglich aus dem Sanskrit stammt.



MATTHIAS DÜGG

**ELEKTROLYSE einer Kaliumiodid-Lösung mit der Orangenbatterie. Das Zinkblech in der Orange (hinten links) ist über ein Kabel mit der linken Bleistiftmine verbunden, die Graphitelektrode (hinten rechts) mit der rechten.**

die beiden Elektroden jeweils mit einer dicken Bleistiftmine über ein Kabel. Die Bleistiftminen wiederum tauchen in eine wenige Millimeter tiefe Kaliumiodid-Lösung ein (Konzentration 1 mol/Liter, siehe »Elektrolyse«). Nach wenigen Minuten hat sich die Lösung an der Bleistiftmine, die mit der Graphitelektrode verbunden ist, hellbraun gefärbt. Das deutet darauf hin, dass sich Triiodidionen ( $\text{I}_3^-$ ) gebildet haben. An der anderen Bleistiftmine sieht man durch Zutropfen eines Indikators (etwa einer 0,1-prozentigen ethanolschen Phenolphthalein-Lösung), dass dort Hydroxidionen entstanden sind. Folgende Reaktionen laufen an den Bleistiftminen ab:



QUELLE

Peper-Bienzeisler, R. et al.: Untersuchungen zur Zitronenbatterie. CHEMKON 20/3, 2013

# SONNENAKTIVITÄT GEFAHR DURCH SOLARE SUPERSTÜRME

Geladene Teilchen, die von der Sonne ausgestoßen werden, können die Erde treffen und dort Technik beschädigen. Geochemische Analysen der letzten 10 000 Jahre zeigen, dass solche Eruptionen häufiger vorkommen und schwerer sein können als lange Zeit gedacht.



Jonathan O'Callaghan ist Journalist und berichtet über Raumfahrt und Astrophysik.

» [spektrum.de/artikel/1989112](https://www.spektrum.de/artikel/1989112)



**KORONALER  
MASSENAUSWURF**  
Bei einer Eruption am  
31. August 2012 stieß die  
Sonne einen gigantischen  
Bogen ihres heißen Plas-  
mas ins All. Die Länge des  
hier sichtbaren Filaments  
entspricht mehreren Dutzend  
Erddurchmessern.

Die Sonne ist nicht immer so ruhig und unveränderlich, wie sie aus der Ferne scheint. Vielmehr gibt es auf unserem Stern von Zeit zu Zeit gewaltige Eruptionen, bei denen aus der Oberfläche unvorstellbare Mengen an energiereichen Teilchen hervorbrechen. Solche »koronalen Massenauswürfe« dauern zwar nur einige Stunden, aber können auf der Erde verheerende Schäden anrichten. Ein Beispiel dafür sticht in der Geschichtsschreibung besonders hervor: das Carrington-Ereignis von 1859, benannt nach dem englischen Astronomen Richard Christopher Carrington, der es seinerzeit genau dokumentierte.

Dabei überrollte ein so genannter magnetischer Sturm die Erde, das heißt, die elektrisch geladenen Teilchen aus dem Sonnenplasma brachten das Magnetfeld unseres Planeten durcheinander. Das erzeugte nicht nur prachtvolle Polarlichter bis in tiefe Breitengrade, sondern außerdem Spannungsspitzen im weltweiten Telegrafienetz, die sogar Brände auslösten. Damals hinterließ das exotische Phänomen nur begrenzte Schäden an der Infrastruktur. Heute jedoch gilt ein magnetischer Sturm, der mit dem Carrington-Ereignis vergleichbar wäre, als Katastrophenszenario, bei dem die induzierten Ströme etwa Transformatoren und Signalverstärker in Leitungsnetzen zerstören würden. Beobachtungen aus jüngerer Zeit sowie Daten zu weiteren Vorkommnissen aus der Vergangenheit verdeutlichen die ständige Gefahr.

Sonnenstürme können sogar noch energiereicher sein. 2012 hat ein Team um die japanische Physikerin Fusa Miyake Hinweise auf einen Teilchenschauer entdeckt, der sich etwa im Jahr 775 ereignete und rund 10- bis 100-mal gewaltiger war als das Carrington-Ereignis. Nicolas Brehm von der ETH Zürich, der die Sonnenaktivität in der Vergangenheit untersucht, meint dazu: »Wir hatten ein Ereignis so einer Größenordnung bis dahin nicht für möglich gehalten.« Miyake und ihr Team konnten sich die Ursache anfangs nicht erklären; andere Forscher spekulierten bald, es könnte das Ergebnis einer »Superflare« sein, die viel stärker wäre als eine normale Sonneneruption. Schätzungen zufolge sollte so etwas nur einmal im Verlauf von 10000 Jahren passieren.

Nun stellt sich heraus: Solche Phänomene treten wohl häufiger auf als zunächst gedacht. Gemeinsam mit internationalen Kolleginnen und Kollegen hat Brehm 2021 bei geochemischen Untersuchungen zwei weitere, beunruhigend heftige Sonnenstürme ausgemacht. Der erste ereignete sich 7176 v. Chr., der zweite 5259 v. Chr. Beide dürften mindestens so stark gewesen sein wie jener von 775. Nach ihrer Entdeckerin heißen derartige Superflares heute Miyake-Ereignisse.

Die Suche nach Sonneneruptionen in der irdischen Geschichte basiert auf Analysen von Proben aus dem Eis an den Polkappen sowie von alten Bäumen, die in Mooren oder auf Berggipfeln konserviert wurden. Wenn Teilchen von der Sonne auf die Atmosphäre treffen, erzeugen sie radioaktive Varianten verschiedener Elemente. Diese Isotope reichern sich in der Umwelt an. Dergestalt gebildeter Kohlenstoff-14 wird etwa von wachsenden Bäumen eingelagert. Mit Hilfe der charakteristischen Jahresringe im Stamm lassen sich die erhöhten Isotopenkonzentrationen konkreten Zeiträumen zuordnen. Je mehr Kohlenstoff-14 in einem Abschnitt vorhanden ist, desto mehr energiereiche Teilchen von der Sonne haben zum Zeitpunkt seiner Entstehung die Atmosphäre bombardiert.

### Die natürlichen Datenschreiber der letzten Jahrtausende sind nur zum Teil ausgewertet

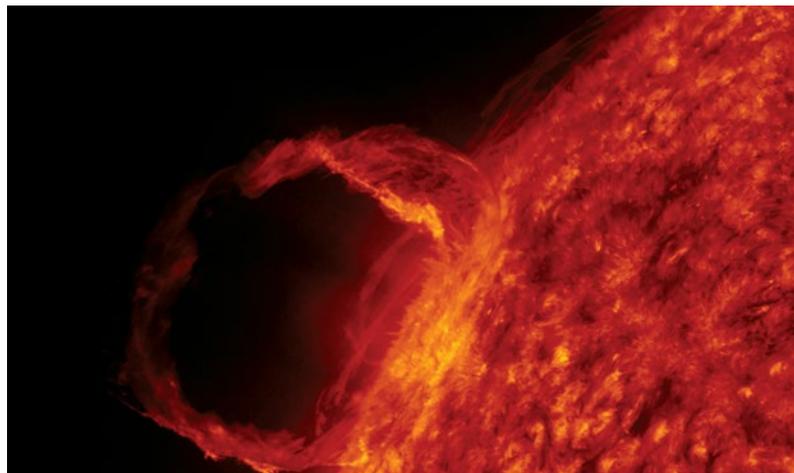
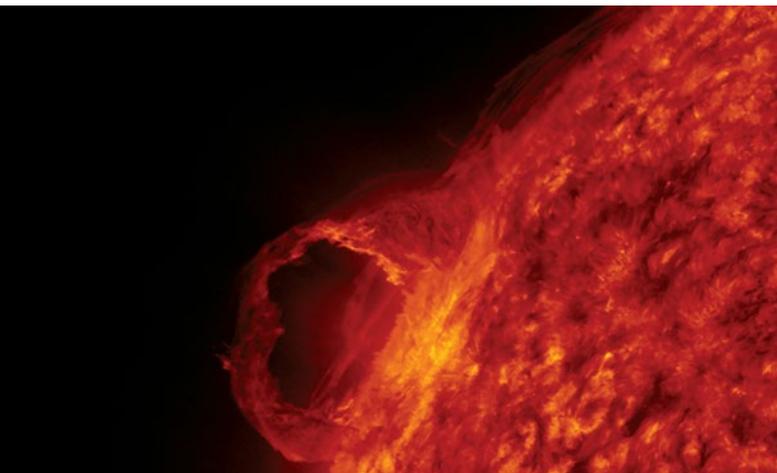
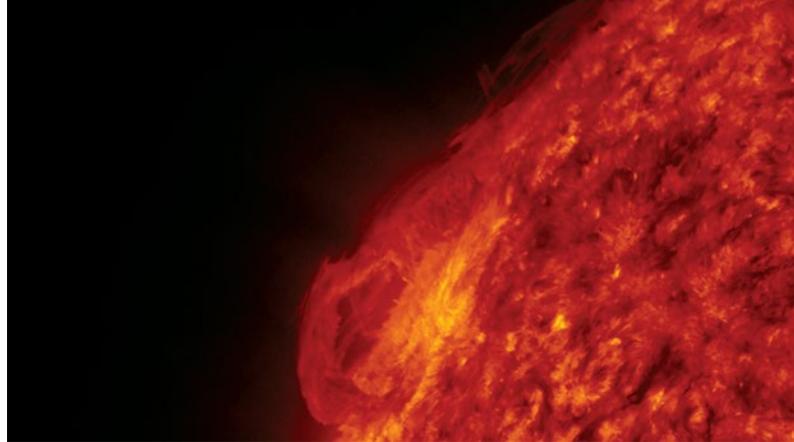
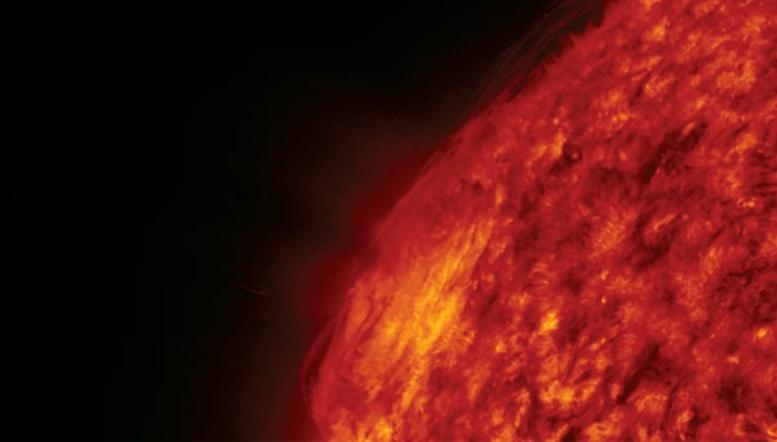
Die Isotopenkonzentrationen von Beryllium-10 und Chlor-36 in Eisbohrkernen liefern ähnliche, wenn auch zeitlich etwas weniger genau eingrenzbar Datensätze. Zusammengenommen ermöglichen die beiden Methoden Einblicke in die irdische Vergangenheit. Dabei gibt es zwar Jahresringdaten für den größten Teil des Holozäns, der gegenwärtigen geologischen Epoche, die vor etwa 12000 Jahren begann. Es ist jedoch aufwändig, das Material nach Ausschlägen bei der Kohlenstoff-14-Konzentration zu durchsuchen. Für ein einzelnes Jahr müssen in der Regel wochenlang mehrere Proben von Jahresringen analysiert und miteinander korreliert werden. »Von den 12000 Jahren des Holozäns haben wir erst 16 Prozent geschafft«, kommentiert Alexandra Bayliss, Umweltwissenschaftlerin und Datierungsspezialistin an der britischen University of Stirling und Koautorin von Brehms Studie. »Letztlich ist es eine Frage von Zeit und Geld.«

Brehm und sein Team hatten Glück. Für das Ereignis im Jahr 7176 v. Chr. haben sie in Eisbohrkernen erste Hinweise auf außergewöhnlich viel Beryllium-10 gefunden. Sie untersuchten daraufhin Jahresringe und erkannten einen dazu passenden Ausschlag bei der Kohlenstoff-14-Menge. Beim Fall von 5259 v. Chr. hatte Bayliss, die Objekte aus der Jungsteinzeit untersucht, eine Lücke in den archäologischen Daten festgestellt. Beim Versuch, diese mit der Analyse von Baumstämmen aus jener Zeit zu schließen, fand das Team wiederum reichlich Kohlenstoff-14. In beiden Fällen entsprach die Menge etwa den Isotopenkonzentrationen, die Miyake in ihren Nachweisen des Ereignisses von 775 gemessen hatte.

Bereits kurz nach Miyakes Fund 2012 sprachen sich die US-Physiker Adrian Melott und Brian Thomas für die Sonne als Verursacherin solcher Isotopenspitzen aus. »Schon

## AUF EINEN BLICK HIMMLISCHE ZEITBOMBE

- 1 Sterne schleudern häufig große Mengen ihres brodelnden Plasmas in die Umgebung. Manchmal stößt die Materie auf einen Planeten und beeinflusst dessen Magnetfeld und Atmosphäre.
- 2 Die Sonne gilt als relativ ruhig. Dennoch haben Eruptionen seit Mitte des 19. Jahrhunderts immer wieder Telekommunikations- und Stromnetze gestört.
- 3 Laut neueren Datenerhebungen sind sogar noch viel energiereichere Massenauswürfe möglich. Ein Volltreffer wäre für Satelliten sowie unsere moderne technische Infrastruktur am Boden fatal.



NASA/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER/SCIENTIFIC VISUALIZATION STUDIO (SIS/GSFC, NASA, GOV/3715)

**PROTUBERANZ** Bei Materieströmen, die von uns aus gesehen am Rand der Sonnenscheibe vor dunklem Hintergrund stattfinden, lässt sich gut eine typische Bogenform erkennen. Sie entsteht durch die Bewegung der geladenen Teilchen entlang der Magnetfeldlinien. Die hier gezeigte, zehn Erddurchmesser hohe Eruption spielte sich am 30. März 2010 ab.

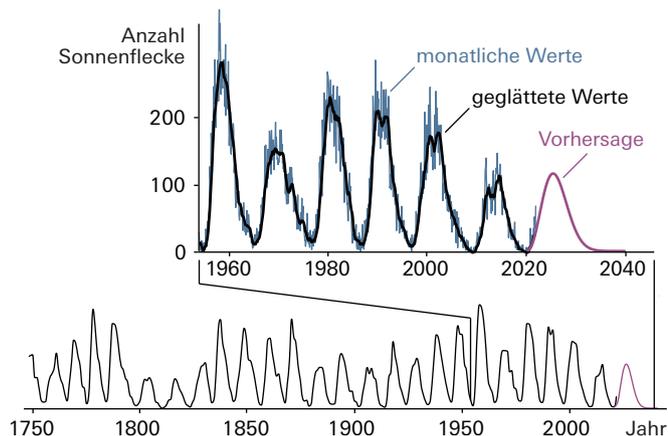
damals vermuteten einige dahinter stattdessen eine Supernova oder sogar einen Gammastrahlenausbruch«, erinnert sich Thomas, der nicht an der Studie von Brehm beteiligt war. »Aber so etwas passiert einfach zu selten. Eine Erklärung auf Grundlage solarer Aktivität passt deutlich besser.« Solche starken, häufigen Ausschläge seien demnach eher

das Ergebnis erhöhter Sonnenaktivität, möglicherweise begleitet von einem geomagnetischen Sturm ähnlich dem Carrington-Ereignis – bloß erheblich intensiver. Bayliss stellt nämlich fest: »Das Carrington-Ereignis ist in Baumringen und Eisbohrkernen nicht einmal nachweisbar.« Das Spektakel von 1859 scheint also vergleichsweise harmlos gewesen zu sein.

Indes bleibt unklar, wie eine größere Menge von Partikeln von der Sonne und ein begleitender magnetischer Sturm zusammenhängen. »Ein intensives Niederprasseln von Teilchen wird oft mit einem magnetischen Sturm in Verbindung gebracht, aber das muss nicht unbedingt sein«, sagt Thomas. Es könnte sogar sein, dass Vorgänge wie das Carrington-Ereignis überhaupt keine Spitzen bei der Menge von Kohlenstoff-14 verursachen. Das würde dessen Abwe-

## Sonnenzyklen

Seit Mitte des 18. Jahrhunderts wird die Zahl der Sonnenflecke systematisch erfasst. Diese dunkleren Bereiche entstehen, wenn Bündel von Magnetfeldern aus dem Inneren hervorbrennen. Sie sind ein gut beobachtbares Maß für die Aktivität der Sonne. Ihre Häufigkeit wechselt alle etwa elf Jahre periodisch; beim Maximum kehrt sich die Polarität des solaren Felds um. Seit Beobachtungsbeginn gab es 24 vollständige Zyklen. Der 25. hat mit dem letzten Minimum Ende 2019 begonnen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MINE.ZEITZ

senheit in zugehörigen Jahresringen und Eisbohrkernen erklären. Zumindest das Vorkommnis im Jahr 775 scheint immerhin von intensiven Polarlichtern begleitet worden zu sein, wie Aufzeichnungen aus China nahelegen. Das deutet auf einen magnetischen Sturm neben dem gewaltigen Teilchenbombardement hin. »Die sicherste Wette dürfte sein, bei all diesen Ereignissen auf starke magneti-

Miyake-Ereignis hätte fast unkalkulierbare Folgen. »Von einem Ereignis der Carrington-Größenordnung könnten wir uns erholen, weil keine Daten gelöscht werden«, erläutert Abdu Jyothi. »Bei etwas, das 10- oder 100-mal stärker ist, bin ich mir nicht mehr sicher. Möglicherweise verlieren wir alle Aufzeichnungen.«

Allerdings dürfte die Gefahr für unsere Zivilisation, in absehbarer Zeit von einem Miyake-Ereignis in ein dunkles Zeitalter gestürzt zu werden, rein mathematisch eher gering sein. Bezüglich eines Vorkommnisses auf Carrington-Niveau im Lauf der nächsten zehn Jahre werden jedoch Wahrscheinlichkeiten von bis zu zwölf Prozent gehandelt. Wir können eine drohende Katastrophe am besten abwenden, indem wir die Sonnenaktivität überwachen und kritische Infrastruktur abschalten, bevor ein koronaler Massenauswurf rund einen Tag später hier auftritt.

In alten Jahresringen und Eisbohrkernen finden Fachleute unterdessen immer wieder Hinweise auf weitere extreme Sonnenstürme. »Wir erkennen allmählich, dass die Sonne viel aktiver sein kann als gedacht«, resümiert Thomas. »Nach der Entdeckung von Superflares bei anderen Sternen war umstritten, ob auch unserer zu so etwas in der Lage wäre. Den Daten zufolge scheint das der Fall zu sein.« ◀



### Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

sche Stürme zu setzen«, glaubt Thomas. Das hieße, dass die Erde allein in den letzten 10000 Jahren von mindestens drei Superflares heimgesucht wurde. Beweise für weitere könnten in den 84 Prozent der Jahresringdaten stecken, die noch ihrer Untersuchung harren.

Wenn sich ein derart kräftiger Sonnensturm heutzutage ereignen und uns treffen würde, hätte das verheerende Auswirkungen auf die Satelliten in der Erdumlaufbahn und auf die Infrastruktur am Boden. Die Computerwissenschaftlerin Sangeetha Abdu Jyothi von der University of California in Irvine hat 2021 für einen Sturm vom Ausmaß des Carrington-Ereignisses sogar eine »Internetapokalypse« prophezeit. Die induzierten Ströme könnten Unterseekabel unbrauchbar machen, da alle rund 100 Kilometer Signalverstärker in die Kabel eingearbeitet sind, die womöglich massenhaft zerstört würden. Das könnte den weltweiten Internetverkehr über Wochen oder gar Monate lahmlegen. Allein in den USA läge der Schaden durch eine solche Katastrophe nach Schätzungen von Abdu Jyothi bei täglich sieben Milliarden Dollar. Ein noch heftigeres

### QUELLEN

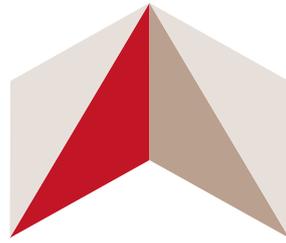
**Brehm, N. et al.:** Tree rings reveal two strong solar proton events in 7176 and 5259 BCE. Research Square 10.21203/rs.3.rs-753272/v1

**Jyothi, S. A.:** Solar superstorms: Planning for an internet apocalypse. Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM Conference, 2021

**Melott, A. L., Thomas, B. C.:** Causes of an AD 774–775 <sup>14</sup>C increase. Nature 491, 2012

**Miyake, F. et al.:** A signature of cosmic-ray increase in AD 774–775 from tree rings in Japan. Nature 486, 2012

**Paleari, C. I. et al.:** Cosmogenic radionuclides reveal an extreme solar particle storm near a solar minimum 9125 years BP. Nature Communications 13, 2022



# Georg von Holtzbrinck Preis für Wissenschaftsjournalismus

## AUSSCHREIBUNG 2022

### JETZT BEWERBEN

bis zum 4. April 2022

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

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

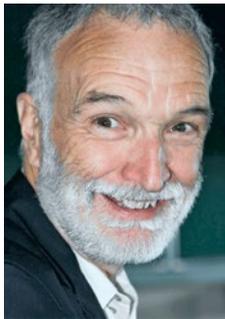
Es wird ein Preis in der **Kategorie Text**, ein Preis in der **Kategorie Elektronische Medien** und ein Preis in der **Kategorie Nachwuchs** vergeben.

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

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

# SCHLICHTING! KRATZER UM DIE SONNE

**Feinste Kratzer auf glatten Oberflächen sind normalerweise unsichtbar. Unter der Sonne treten sie allerdings abschnittsweise als dünne, manchmal bunt schillernde Streifen hervor, die sich scheinbar kreisrund um das Bild der Lichtquelle herumgruppieren.**



**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/1989115](http://spektrum.de/artikel/1989115)

**Es dringt in jede Spalte, zeichnet alle Formen – auch die unsichtbaren**

Andrzej Stasiuk (\*1960)

Die meisten Menschen würden wohl behaupten, ein frisch lackiertes Auto glänze am schönsten. Wenn man hingegen auf einen speziellen physikalischen Effekt aus ist, darf die Autokarosserie nicht mehr ganz fabrikneu sein. Dann bildet sich an klaren Tagen um das reflektierte Bild der Sonne herum ein konzentrisch aussehendes System von mehr oder weniger kurzen Lichtstreifen. Sie schillern überdies häufig in verschiedenen Spektralfarben (siehe »Leuchtspuren«).

Besonders lange genutzte Fahrzeuge ergeben die schönsten Effekte. Denn die Ringe werden letztlich durch Gebrauchsspuren hervorgerufen, die im Lauf der Zeit durch mechanische Einwirkungen auf den Lack entstehen. Daran sind die rotierenden Bürsten beim Waschen

**LEUCHTSPUREN** Auf der Karosserie eines älteren Autos ist das Spiegelbild der Sonne von kreisförmig angeordneten Strichen umgeben. Viele von ihnen zeigen deutliche Interferenzfarben.

oder das manuelle Säubern ebenso beteiligt wie Schmutzteilchen, die über den Lack hinwegstreichen und dabei mikroskopisch kleine Rillen hinterlassen.

Auf den ersten Blick könnte man vermuten, es wären kreisförmige Streifen für das Phänomen verantwortlich, vielleicht durch entsprechende Bewegungen beim Polieren in diesem Bereich. Doch die leuchtenden Ringe bewegen sich mit dem Reflex der Lichtquelle mit und treten an fast jeder beliebigen Stelle in Erscheinung. Es muss eine andere Ursache geben.

Schaut man sich die hellen Striche genauer an, so erkennt man: Sie sind meist gar nicht gekrümmt, sondern es handelt sich um geradlinige Riefen, die sich wie Tangentenstücke an imaginäre Kreise um den Sonnenreflex herumgruppieren. Offenbar sieht man nur jene Abschnitte der Kratzer, die gerade so orientiert sind, dass sie das Licht ins Auge reflektieren. Auf die Weise entsteht insgesamt scheinbar eine kreisförmige Struktur. Unser visuelles System verstärkt den Eindruck, denn es tendiert dazu, Reize möglichst ausgewogen und symmetrisch wahrzunehmen. Denn wegen der Zufallsverteilung der Rillen kann es in Wirklichkeit keine aus tangentialen Stücken zusammengesetzten geschlossenen Kreise geben.

Wie kommt es zu dem Phänomen? Auf einer perfekt glatten Oberfläche wäre das Spiegelbild der Sonne genau auf einer Fläche zu sehen – und nur dort –, von der die einzelnen Punkte der Sonnenscheibe nach dem



an den Stellen passender Winkel auf. Da die Sonne eine ausgedehnte Lichtquelle ist, erhellt sie nicht nur einen Punkt, sondern die Reflexion erstreckt sich noch über ein kleines Stück zu dessen Seiten. Die Länge der strahlenden Abschnitte hängt mit der scheinbaren Größe der Sonne zusammen. Außerdem sind die Reflexe an einem Kratzer auch deshalb nicht auf einen Punkt beschränkt, weil die Innenseiten unregelmäßig strukturiert sind und an mehreren Stellen passende Bedingungen bieten. Aus Symmetriegründen gelten die Überlegungen für alle tangential um das Spiegelbild der Sonne herum orientierten Rillen. Mit zunehmendem Abstand vom Zentrum sind immer steilere Neigungen für eine Reflexion zum Betrachter erforderlich. Da diese seltener vorkommen, nehmen die Häufigkeit und die Helligkeit leuchtender Kratzerabschnitte nach außen hin ab.

Obwohl die funkelnden Stellen einen Eindruck davon vermitteln, wie stark der Autolack vom Alltag gezeichnet ist, muss man sich vor Augen führen, dass die tatsächliche Zahl und Länge der winzigen Schrammen noch wesentlich größer sind. Eine Computersimulation veranschaulicht das: Man kann für eine Zufallsverteilung unterschiedlicher Kratzer, die im diffusen Licht unsichtbar sind, die Abschnitte visualisieren, die mit einer senkrecht darüber angebrachten Punktlichtquelle zu Tage treten (siehe »Modellierte Macken«). Dann zeichnen die Reflexionen ein ähnliches Muster wie auf einem Autodach und spiegeln doch immer nur einen Bruchteil aller Unebenheiten wider.

Solche strahlenden Ringe lassen sich außerdem beispielsweise als Reflexionen auf Besteck und weiteren intransparenten Objekten erkennen, aber auch beim Blick durch die Kunststofffenster eines Flugzeugs. Diese sind ebenso mechanischen Einwirkungen ausgesetzt. Von den winzigen Spuren sieht man nur etwas, wenn man durch das Fenster hindurch auf eine Lichtquelle blickt. In dem Fall gruppieren sich die hellen Abschnitte nicht um das Spiegelbild, sondern um das Original der Lichtquelle (siehe »Spektrum« August 2019, S. 58). Daher unterscheiden sich die physikalischen Verhältnisse insofern, als das Licht hier nicht an den Kratzern reflektiert, sondern an ihnen gebrochen wird.

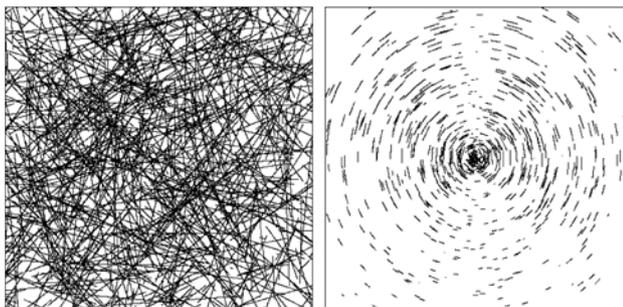
Bei genauerem Hinschauen glitzern viele Rillen bunt. Offenbar sind einige der feinen Unregelmäßigkeiten von der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts. Dann kommt es zur Beugung, die das einfallende weiße Licht in die Bestandteile seines Spektrums zerlegt. Die Strukturen wirken wie feine Spalte, entlang derer die auftreffende Strahlungsfront Elementarwellen in alle möglichen Richtungen aussendet.

Überlagern sie sich im Auge oder auf dem Chip der Kamera, so werden entsprechend den jeweiligen Wegunterschieden bestimmte Wellenlängen verstärkt oder abgeschwächt. Je nach Beobachtungsposition schimmern die Schrammen oft so intensiv farbig, dass sie viel breiter wirken, als sie in Wirklichkeit sind.

Reflexionsgesetz ins Auge geworfen werden. Nun sehen wir aber viele Stellen glänzen, die vom Spiegelbild der Sonne ein Stück entfernt sind. Darum können die reflektierenden Flächenelemente nicht in derselben Ebene liegen wie die gespiegelte Sonne. Sie müssen vielmehr zu ihr hingeneigt sein und zwar umso stärker, je weiter weg sie liegen.

Die Erklärung liegt im u-förmigen Querschnitt der Kratzer. Deswegen existiert ein ganzes Spektrum unterschiedlich geneigter Flächenelemente, und jedes leuchtet

**MODELLIERTE MACKEN** Bei einer einfachen Computersimulation sind von den normalerweise nicht erkennbaren Rillen (links) unter einer Punktlichtquelle nur einige Abschnitte zu sehen (rechts).





# KÜNSTLICHE INTELLIGENZ BERECHNETE GEFÜHLE

**Technologieunternehmen setzen zunehmend KI ein, um die Emotionen und die Persönlichkeit von Menschen zu analysieren. Aber die Methoden sind oft anfällig für rassistische, kulturelle und geschlechtsspezifische Vorurteile. Wo führt die Reise hin?**



**John McQuaid** ist Journalist und Doktorand an der University of Maryland.

► [spektrum.de/artikel/1989118](https://spektrum.de/artikel/1989118)

Im Februar 2020 fand in Liverpool eine Konferenz zum mäßig reizvollen Thema »öffentliches Beschaffungswesen« statt. Wie bei solchen Veranstaltungen üblich, schlenderten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer an den Ausstellungs- und Verkaufsständen vorbei, blieben an einigen stehen, während sie andere umgingen. Was nicht allen Besuchern bewusst war: Sie wurden dabei genau beobachtet. 24 diskret angebrachte Kameras verfolgten die Bewegungen jedes einzelnen Menschen und zeichneten mit fünf bis zehn Bildern pro Sekunde die subtilen Bewegungen seiner Gesichtsmuskeln auf, während er die verschiedenen Ausstellungsstücke beäugte. Die Aufnahmen wurden in ein Computernetzwerk eingespeist, in dem KI-Algorithmen das Geschlecht und die Altersgruppe der Beobachtungsobjekte schätzten und die Mimik auf emotionale Anzeichen wie »Neugier« und »Freude« absuchten.

Ungefähr ein Jahr nach der Veranstaltung war Panos Moutafis, CEO des in Texas ansässigen Unternehmens Zenus, das hinter der dort genutzten Technologie steht, immer noch begeistert von den Ergebnissen. »Ich habe nicht viele kommerzielle Systeme gesehen, die so präzise sind«, äußerte er während eines Videoanrufs und zeigte ein Foto der untersuchten Menschenmenge, bei dem jedes Gesicht mit einem Kästchen umrandet ist. Die Zenus-Ingenieure hatten die Software zuvor auf das Erkennen von Emotionen trainiert, indem sie ihr einen riesigen Datensatz

**GESICHTSSCAN** Einige KI-Technologien können große Menschenmengen absuchen und Emotionen in den Gesichtern der Personen analysieren.

von Gesichtsausdrücken mit Beschriftungen, die relevante Gefühle beschreiben, vorlegten. Das Unternehmen hat den Algorithmus auf verschiedene Weise überprüft, unter anderem in Live-Tests, bei denen Menschen berichteten, wie sie sich fühlten, während man sie fotografierte. Das System funktioniert laut Moutafis überall: in Innenräumen, ohne Beleuchtung und im Freien sowie wenn die Personen Masken, Hüte oder Sonnenbrillen tragen.

Die Software von Zenus ist nur eines von vielen Beispielen für eine neue Technologie: die emotionale KI oder affektive Datenverarbeitung, bei der man Kameras und andere Geräte mit künstlicher Intelligenz kombiniert, um Gesichtsausdrücke, Körpersprache, Stimmlage und weitere Merkmale zu erfassen. Das Ziel ist es, über die reine Gesichtserkennung hinauszugehen und etwas zu enthüllen, was für Maschinen zuvor unsichtbar war: die inneren Gefühle, Motivationen und Einstellungen der Menschen. »Bisher waren Kameras dumm«, so Jay Stanley, Senior Policy Analyst bei der Nichtregierungsorganisation American Civil Liberties Union. »Jetzt wachen sie auf. Sie erlangen die Fähigkeit, nicht nur stumm aufzuzeichnen, was wir tun, sondern auch darüber zu urteilen.«

## **Hundewelpen und Eiscreme statt Freibier**

Emotionale KI hat sich zu einem beliebten Marktforschungsinstrument entwickelt. Zum Beispiel konnte Zenus den Mitarbeitern von Hilton-Hotels nach einer Messe erklären, dass die Veranstaltung mit Hundewelpen und Eiscreme besser ankam als die offene Bar mit Freigetränken. Die Technologie erstreckt sich allerdings auf Bereiche, bei denen es um viel mehr geht, als Messebesucher glücklich zu machen. Man setzt mittlerweile intelligente Systeme ein, die Hinweise auf Gefühle, Charakter und Absichten von Personen untersuchen, um Bedrohungen an Grenzkontrollstellen zu erkennen, Bewerber für Stellenangebote zu bewerten, Klassenzimmer zu überwachen und Anzeichen für aggressives Fahren zu finden. Autohersteller integrieren die Technologie daher in kommende Fahrzeuggenerationen; Amazon, Microsoft, Google und andere Technologieunternehmen bieten cloudbasierte emotionale

KI-Dienste an, die sie mit Gesichtserkennung kombinieren; Dutzende Start-ups bringen Anwendungen auf den Markt, um Unternehmen bei Einstellungsentscheidungen zu helfen. In Südkorea ist die Praxis inzwischen so weit verbreitet, dass Job-Coaches mit ihren Kunden KI-Interviews proben.

KI-Systeme nutzen verschiedene Arten von Daten, um Erkenntnisse über Emotionen und Verhalten zu gewinnen. Neben Gesichtsausdruck, Klang der Stimme, Körpersprache und Gangart können sie auch Texte oder Audioaufnahmen auf Stimmungen und Ansichten analysieren. Einige Anwendungen nutzen die gesammelten Daten, um nicht bloß nach Gefühlslagen zu suchen, sondern den Charakter einer Person zu bestimmen.

Kritiker warnen jedoch, emotionale KI-Systeme würden zu Zwecken eingesetzt, die ihre Kompetenz übersteigen – was gefährliche Folgen hätte. Ein Problem stellen etwa die Datensätze dar, mit denen man die Algorithmen trainiert: Sie enthalten teilweise rassistische, ethnische und geschlechtsspezifische Vorurteile, was wiederum die Bewertungen der KI beeinträchtigt, zum Beispiel angesichts nicht weißer Bewerber. »Es gibt die Vorstellung, dass wir einen Teil unserer kognitiven Prozesse auf diese Systeme abwälzen können«, so die Informationswissenschaftlerin Lauren Rhue von der University of Maryland, »damit wir dank ihrer Analyse sagen können ›Diese Person zeigt ein bedrohliches Verhalten«. Das ist der Punkt, an dem wir uns in einen gefährlichen Bereich begeben.«

Aber nicht nur die Datensätze bergen Risiken, auch die zu Grunde liegende Wissenschaft ist umstritten. Viele Anwendungen der emotionalen KI basieren auf Forschungsarbeiten von Paul Ekman und Wallace Friesen, die bereits ein halbes Jahrhundert zurückliegen. Die Psychologen stellten damals die Theorie auf, dass eine Hand voll Gesichtsausdrücke den grundlegenden Emotionen (Wut, Ekel, Angst, Freude, Traurigkeit und Überraschung; Ekman fügte der Liste später noch Verachtung hinzu) entsprechen und die Mimiken eine universell verständliche Sprache bilden. Diese Vorstellung wird heute jedoch heftig diskutiert. Mittlerweile haben Fachleute erhebliche kulturelle und

individuelle Unterschiede gefunden. Deshalb sind viele von ihnen der Meinung, Computer könnten die Feinheiten der menschlichen Mimik bei verschiedenen Personen nicht (oder zumindest noch nicht) verstehen, da diese nicht unbedingt mit stereotypen inneren Gefühlen übereinstimmen. Selbst Ekman, der frühe Formen der algorithmischen Emotionserkennung mitentwickelt hat, ist heute der Auffassung, dass die Technologie die Privatsphäre bedroht und man sie deshalb regulieren sollte.

Dennoch ist emotionale KI nicht per se schlecht. Wenn sich Maschinen darauf trainieren lassen, Gefühle und Verhaltensweisen zuverlässig zu interpretieren, ist das Potenzial für Bereiche wie die Robotik, das Gesundheitswesen oder die Automobilindustrie enorm, urteilen Experten. Allerdings sind die Programme aktuell praktisch für alle uneingeschränkt nutzbar. So könnte eine Technologie allgegenwärtig werden, die auf weitgehend unbewiesenen Annahmen fußt, bevor die Gesellschaft Zeit hat, die damit einhergehenden Risiken abzuwägen.

### Interview mit einer KI

2018 suchte Mark Gray, damals Vizepräsident für Personal und Geschäftsbetrieb beim Technikunternehmen Airtame, nach Möglichkeiten, den Einstellungsprozess seiner Firma zu verbessern. Airtame produziert Geräte, um Präsentationen und Bildschirme gemeinsam zu nutzen, und beschäftigt etwa 100 Mitarbeiter, die sich auf Büros in Kopenhagen, New York City, Los Angeles und Budapest verteilen. Bei offenen Stellen, gerade im Bereich von Marketing und Design, können allerdings Hunderte von Bewerbungen eingehen, was die Personalabteilung oft überfordert. Gray ärgerte zudem die Willkür bei Einstellungsentscheidungen. »Oft habe ich das Gefühl, dass eine Stimme im Hinterkopf sagt: ›Ich mag diese Person«, und nicht ›Diese Person erscheint kompetenter«, erklärt er. »Ich wollte herausfinden, wie man dem Einstellungsverfahren einen greifbaren Aspekt hinzufügen kann.«

Dazu schloss Airtame einen Vertrag mit dem in München ansässigen Unternehmen Retorio ab, das Videointerviews mit KI auswertet. Dafür müssen die Bewerber bloß etwa 60 Sekunden lange Antworten auf zwei oder drei Fragen aufnehmen, woraufhin der Algorithmus den Gesichtsausdruck und die Stimme der Befragten sowie den Inhalt ihrer Worte analysiert. Anschließend erstellt das System ein Profil, das auf fünf grundlegenden Persönlichkeitsmerkmalen basiert, dem in der Psychologie weit verbreiteten Modell der »Big Five«, das nach den Anfangsbuchstaben der englischen Begriffe auch OCEAN genannt wird: Offenheit für Erfahrungen (openness), Gewissenhaftigkeit (conscientiousness), Extraversion, Verträglichkeit (agreeableness) und Neurotizismus (neuroticism, emotionale Labilität). Die Personalverantwortlichen erhalten anschließend eine Rangliste der geeignetsten Kandidaten für die Stelle.

Solche Software verändert die Art und Weise, wie Geschäftsentscheidungen getroffen werden und wie Unternehmen mit Menschen umgehen. Bei Airtame habe sich die Bewerber-Profilerstellung bewährt, findet Gray. Wie sich herausstellte, stimmt die Arbeitsleistung mehrerer kürzlich

## AUF EINEN BLICK DAS INNERSTE DURCHLEUCHTEN

- 1 Firmen nutzen Algorithmen, um die Gefühle, Empfindungen und sogar die Persönlichkeit von Menschen zu untersuchen.
- 2 Dadurch lässt sich besser beurteilen, ob ein Bewerber für einen bestimmten Job geeignet ist, die Produkte einer Messe ansprechend sind oder Schüler aufmerksam dem Unterricht folgen.
- 3 Aber die Datensätze, mit denen man die KI trainiert, enthalten oft vorurteilsbehaftete Inhalte. Zudem stehen die genutzten psychologischen Modelle in der Kritik.



**BASIS-EMOTIONEN** Viele der KI-Algorithmen nutzen Erkenntnisse des Psychologen Paul Ekman. Ihm zufolge gibt es universelle Gesichtsausdrücke, welche die inneren Gefühle preisgeben, wie (von links nach rechts): Trauer, Freude, Wut, Angst und Überraschung.

eingestellter Vertriebsmitarbeiter mit ihren Persönlichkeitswerten überein, wobei jene mit besseren Ergebnissen für Gewissenhaftigkeit, Verträglichkeit und Offenheit auch beruflich am besten abschneiden.

Maschinen, die Emotionen verstehen, gibt es schon lange in Sciencefiction-Filmen und -Literatur. In der Informatik und im Ingenieurwesen schien diese Fähigkeit allerdings unerreichbar. Noch in den 1990er Jahren »war es ein Tabuthema«, erinnert sich Rosalind Picard vom Massachusetts Institute of Technology (MIT), die 1995 den Begriff »affective computing« prägte. »Wenn ich es ansprach, hielt man mich für verrückt, dumm und peinlich. Ein angesehenen Kollege sagte mir damals: ›Sie verschwenden Ihre Zeit – Emotionen sind nur Rauschen.«

### Antrainierte Vorurteile

Ungeachtet dessen entwickelten Picard und andere Fachleute Instrumente, die automatisch biometrische Informationen, welche auf emotionale Zustände hinweisen (von Mimik und Gestik bis zur Durchblutung), detektieren und darauf reagieren. Die heutige Technologie geht jedoch auf den zunehmenden Einsatz neuronaler Netze zurück, die dem biologischen Gehirn nachempfunden sind. Das damit verbundene »Deep Learning« hat die Leistung und die Genauigkeit von KI-Algorithmen enorm gesteigert; dadurch lassen sich Aufgaben automatisieren, die zuvor nur Menschen zuverlässig erledigen konnten, etwa Autofahren, Gesichtserkennung und die Analyse medizinischer Scans.

Trotzdem sind solche Systeme weit davon entfernt, perfekt zu sein – und die emotionale KI stellt eine besonders große Herausforderung dar. KI-Algorithmen lernen, indem sie Daten (häufig Bilder, aber auch Video-, Audio-

und anderen Dateien) wiederholt mit Trainingsdaten vergleichen, bei denen ein gewünschtes Merkmal gekennzeichnet ist. Auf diese Weise kann ein System relevante Gemeinsamkeiten ausmachen, etwa spitze Ohren bei Katzen.

Wenn es dagegen darum geht, schwer zu definierende Eigenschaften wie den Charakter eines Menschen oder Emotionen zu erkennen, wird die Aufgabe extrem komplex. Wie sehen Glück oder Neurotizismus aus? Emotionale KI-Algorithmen können Gefühle, Persönlichkeit oder Absichten nicht direkt ausmachen. Stattdessen trainiert man sie durch eine Art computergestütztes Crowdsourcing darauf, die Auffassungen anderer Menschen nachzuahmen. Kritiker befürchten, dass dieser Prozess zu viele subjektive Variablen mit sich bringt. »Es gibt eine große Diskrepanz zwischen dem, was uns die Technologie zeigt, und dem, was im emotionalen Bereich einer Person vor sich geht«, sagt Kate Crawford von der University of Southern California Annenberg, die sich mit den sozialen Folgen künstlicher Intelligenz beschäftigt. Der Prozess, der zur digitalen Beurteilung eines Menschen führt, ist kompliziert – und jede Stufe birgt potenzielle Fallstricke. Deep Learning ist beispielsweise extrem datenhungrig. Für emotionale KI braucht man riesige Datensätze, die Hunderttausende, Millionen oder manchmal sogar Milliarden menschlicher Urteile kombinieren. Meist handelt es sich dabei um Porträts, die Datenwissenschaftler kategorisiert haben, etwa als glücklich oder lächelnd. Algorithmen können jedoch versehentlich die Vorurteile der Menschen übernehmen, welche die Daten zusammengestellt haben. Das kann von einer verzerrten Demografie in den Trainingsdaten oder unbewussten Ressentiments derjenigen herrühren, die die Daten aufbereiten, oder weitere Gründe haben.

Selbst ein Lächeln zu identifizieren ist alles andere als einfach: 2020 untersuchte Carsten Schwemmer vom GESIS Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften in Köln mit seinen Kollegen Bilder von Kongressabgeordneten mit Hilfe cloudbasierter Emotionserkennungs-Apps von Amazon, Microsoft und Google. Als sie die Aufnahmen selbst durchsahen, machten die Forscherinnen und Forscher 86 Prozent

lächelnde Männer und 91 Prozent lächelnde Frauen aus. Das Ergebnis der Apps sah hingegen völlig anders aus: Google Cloud Vision wies zum Beispiel mehr als 90 Prozent der Frauen, aber weniger als 25 Prozent der Männer das Etikett »Lächeln« zu. Schwemmer und sein Team vermuten, dass es in den Trainingsdaten eine geschlechtsspezifische Verzerrung gibt. Doch auch bei ihrer eigenen Untersuchung ergaben sich häufig Unsicherheiten: »Viele Gesichtsausdrücke waren nicht ganz eindeutig. War das wirklich ein Lächeln? Zählt ein Grinsen? Was ist, wenn man die Zähne sieht, die Person aber nicht glücklich wirkt?«, schrieben die Fachleute in ihrer Studie.

### Lächelnde Frauen und ernste Männer

Auch Gesichtserkennungssysteme standen wegen ihrer Voreingenommenheit vielfach in der Kritik. So haben Forscherinnen und Forscher des MIT Media Lab herausgefunden, dass die Systeme schlechter funktionieren, wenn sie nicht weiße, nicht männliche Gesichter erkennen sollen. Diese Fehler entstehen in der Regel durch unausgewogene Trainingsdatensätze, die in erster Linie Bilder von weißen Männern enthalten. Und Gefühlslagen zu bestimmen gestaltet sich noch wesentlich komplexer: Denn Mimik ist dynamisch, zudem können sich die Ausdrücke auf gestellten Fotos von denen spontaner Schnappschüsse deutlich unterscheiden.

Um die Probleme zu verdeutlichen, nutzte Rhue einen öffentlichen Datensatz mit Bildern von Profi-Basketballspielern und testete damit zwei Emotionserkennungsdienste – einen von Microsoft und einen von Face++, einem in China ansässigen Unternehmen. Beide ordneten nicht weißen Spielern durchweg mehr negative Emotionen zu als weißen, allerdings auf unterschiedliche Weise: Face++ sah erstere doppelt so oft als wütend an wie weiße Spieler; für Microsoft blickten farbige Basketballer hingegen dreimal so oft verächtlich drein wie weiße, wenn der Gesichtsausdruck uneindeutig war. Das Problem lässt sich wahrscheinlich auf eine Verzerrung in den Trainingsdatensätzen zurückführen, schließt Rhue. Microsoft und Face++ wollten sich dazu nicht äußern.

Viele Unternehmen betonen inzwischen, sie seien sich solcher Probleme bewusst und würden sich damit auseinandersetzen. Die Entwickler von Retorio haben ihren Algorithmus beispielsweise mit einem Datensatz trainiert, den bezahlte Freiwillige über mehrere Jahre zusammengestellt haben. Er besteht aus kurzen Videos von Interviews, die mit Persönlichkeitsmerkmalen versehen sind, so der Retorio-Mitbegründer Christoph Hohenberger. Die Firma habe Maßnahmen ergriffen, um verschiedene demografische und kulturelle Verzerrungen herauszufiltern, die dazu führen könnten, dass eine Gruppe im Vergleich zu einer anderen besser abschneidet. Da es derzeit jedoch keine Regulierung oder Aufsicht in der Branche gibt, muss man sich auf die Versprechungen der Unternehmen verlassen, denn die Ausgewogenheit von nicht öffentlichen Datensätzen ist schwer zu überprüfen. HireVue, das Videointerviews KI-basiert analysiert, gehört zu den wenigen Firmen, die einen externen Prüfer hinzugezogen haben, um die Voreingenommenheit ihrer Technologie zu gewährleisten.



AP PHOTO / PICTURE ALLIANCE

Neben unausgewogenen Daten bereitet Kritikern auch ein anderer Punkt Sorgen. Denn die Theorie, wonach der äußere Anschein bei jedem Menschen mit einer entschlüsselbaren inneren Emotion übereinstimmt, stößt mittlerweile auf starken wissenschaftlichen Widerspruch. Das ursprüngliche Konzept entstand vor mehr als 50 Jahren und wird nun immer mehr hinterfragt. Damals führten Ekman und Friesen Feldforschung an der indigenen Gruppe der Fore durch, die im Hochland im Südosten von Papua-Neuguinea beheimatet sind. Die Psychologen wollten herausfinden, ob die Fore Gesichtsausdrücke auf die gleiche Weise erkennen und verstehen wie Menschen mit einem völlig anderen Hintergrund, etwa ein Hafendarbeiter in Brooklyn oder eine Krankenschwester im Senegal. Sie zeigten den Freiwilligen Porträtaufnahmen, welche die sechs grundlegenden Emotionen ausdrückten. Um den Kontext zu verdeutlichen, lieferte ein Übersetzer kurze Beschreibungen (zum Beispiel »Er/Sie sieht etwas an, was schlecht riecht« für Ekel). Die Antworten der Fore waren praktisch identisch mit denen von Menschen, die man in Ländern wie Japan, Brasilien oder den USA befragte. Deshalb gingen die beiden Forscher davon aus, Mimik sei eine universelle Sprache.

Die Vorstellung, dass eine kleine Gruppe von Gesichtsausdrücken die grundlegenden emotionalen Zustände aller Menschen repräsentieren, wurde in der Psychologie und anderen Bereichen schnell populär. Ekman und Friesen entwickelten einen Atlas mit Tausenden entsprechender Bewegungen, um Mimiken zu interpretieren, das so genannte Facial Action Coding System (FACS). Sowohl FACS als auch das dazugehörige Modell bilden die Eckpfeiler der emotionalen KI. Allerdings hat man inzwischen einige Lücken in Ekmans Theorie identifiziert. So belegt eine 2012



**AUS DEM KONTEXT GERISSEN** In einem Bildausschnitt (links) sieht eine junge Frau traurig aus. Betrachtet man jedoch das gesamte Bild (rechts), erkennt man, dass sie sich inmitten einer fröhlichen Menge befindet. Die historische Aufnahme aus dem Jahr 1964 zeigt Fans der Beatles am Flughafen von Los Angeles, wo die Band landete.

erschienene Studie, dass sich die Mimik je nach Kultur erheblich unterscheidet. Sieben Jahre später veröffentlichte die Psychologin Lisa Feldman Barrett von der Northeastern University zusammen mit Kollegen eine Metaanalyse, in der sie mehr als 1000 wissenschaftliche Arbeiten zu dem Thema untersuchten. Die Vorstellung, Gesichter würden universelle Anzeichen für Gefühle zeigen, habe sich von der Technologie bis zu den Rechtswissenschaften durchgesetzt, so die Forscher – doch es gebe kaum Beweise dafür, dass dies in Wahrheit auch so ist.

### **Vereinfachte Modelle passen gut zu den vorhandenen Methoden**

Die grundlegenden Emotionen sind stereotype Kategorien, so Barrett. Der Gesichtsausdruck spiegle oft komplizierte innere Zustände wider – ein Lächeln kann Schmerz überdecken oder Mitgefühl ausdrücken. Für ein KI-System sei es fast unmöglich, das zuverlässig zu kategorisieren. »Es misst etwas und schließt hinterher daraus, was es psychologisch bedeutet«, sagt Barrett. »Aber das sind zwei verschiedene Sachen. Die aktuell beworbene Technologie zur Emotionserkennung vermischt die beiden Dinge routinemäßig.«

Ein Grund für dieses Problem liegt laut Kate Crawford darin, dass viele Start-ups die wissenschaftlichen Debatten in anderen Bereichen nicht kennen. Zudem ziehe die elegante Einfachheit von Systemen wie FACS die Entwickler an: »Sie passt sehr gut zu den Möglichkeiten des maschinellen Lernens. Wenn eine Theorie eine begrenzte Anzahl von Ausdrücken und Emotionen voraussagt, dann machen sich die Leute diese Ansicht vor allem deshalb zu eigen, weil es zu dem passt, was ihre Werkzeuge leisten können.«

Neben der Arbeit von Ekman und dem OCEAN-Persönlichkeitsmodell haben Entwickler auch andere Ideen übernommen. Eine davon ist das von Robert Plutchik entwickelte »Rad der Gefühle«, welches das britische Unternehmen Adoreboard verwendet, um Emotionen in Texten zu analysieren. Selbst wenn sich die Ansätze unterscheiden, versuchen sie alle gleichermaßen, die Komplexität menschlicher Gefühle in einfache Formeln zu übersetzen. Dadurch besitzen sie ähnliche Schwächen. Laut einer Studie liefert etwa das OCEAN-Modell in verschiedenen Kulturen verschiedene Ergebnisse.

Dennoch sind viele Fachleute überzeugt, dass Emotionserkennung funktionieren kann – wenn man die Grenzen der Anwendungen versteht. Die Robotikerin Ayanna Howard von der Ohio State University verwendet beispielsweise in Robotern eine modifizierte Version der Microsoft-Software zum Erfassen von Gesichtsausdrücken, die mit autistischen Kindern interagieren. Registriert ein Roboter zum Beispiel Wut im Gesicht seines Gegenübers, passt er seine Bewegungen an, damit sich die Situation beruhigt. Die stereotypen Mimiken bedeuten vielleicht nicht immer genau das Gleiche, so Howard, trotzdem sind sie nützlich. »Ja, jeder Mensch ist einzigartig, doch man unterscheidet sich nicht so sehr von der Person nebenan«, sagt sie. »Wenn man also über Emotionen im Allgemeinen spricht, kann man sie zwar nicht immer, aber immerhin häufiger als zufällig richtig einschätzen.«

Darum sind laut Barrett Algorithmen, welche die Reaktionen zahlreicher Personen scannen, präziser, weil die Statistik bei einer großen Gruppe relevant wird. Einzelne Personen zu beurteilen ist hingegen tückischer, da alles, was nicht 100 Prozent genau ist, bestimmte Menschen diskriminieren kann.

Viele Spezialisten des Bereichs Computer-Vision sind deshalb vorsichtig, was ihre Versprechen angeht. Immer mehr Unternehmen verzichten mittlerweile darauf, Emotionen direkt abzubilden. »Mit der Entwicklung des Fachgebiets wächst die Einsicht, dass einige Gesichtsausdrücke nichts mit der inneren Gefühlswelt zu tun haben«, erklärt der Informatiker Jonathan Gratch von der University of Southern California. »Sie sind eine Art Werkzeug, mit dem wir uns gegenseitig beeinflussen, fast wie Worte in einem Gespräch, die durchaus eine Bedeutung haben. Sie sind jedoch kein direkter Zugang zu dem, was man in diesem Moment wirklich fühlt.«

Mit den wachsenden Möglichkeiten, emotionale Ausdrücke, Persönlichkeitsmerkmale und Verhaltensweisen digital zu erfassen und daraus Profit zu schlagen, nehmen auch die Bereiche unseres Lebens zu, die sich überwachen lassen. Nach 20 Jahren, in denen Technologieunternehmen persönliche Daten aus dem Online-Verhalten gesammelt haben, steht ihnen nun ein neuer, intimerer Teil von uns zur Verfügung: unsere Gesichter und Körper sowie die Signale, die wir damit aussenden.

»Wenn Coca-Cola online eine Kampagne durchführt, weiß das Unternehmen alles über die Zielgruppe, die es erreicht hat«, sagt Jay Hutton, CEO der in Vancouver ansässigen Firma VSBLTY, die intelligente Kameras und Software zur Untersuchung von Menschenmengen vertreibt. »Aber



Fernsehmoderatorin: **56 %**  
 Lächeln: **64 %**  
 Sprecherin: **56 %**  
 Schwarze Haare: **68 %**  
 Frisur: **84 %**  
 Kinn: **84 %**  
 Person: **92 %**



Öffentlicher Sprecher: **56 %**  
 Rede: **66 %**  
 Business: **56 %**  
 Anzug: **74 %**  
 Sprecher: **72 %**  
 Geschäftsmann: **80 %**  
 amtlich: **88 %**



ZAHLENQUELLE: SCHWEMMER, C. ET AL.: DIAGNOSING GENDER BIAS IN IMAGE RECOGNITION SYSTEMS. SOCIUS 6, 2020, FIG. 5 (DOI.ORG/10.1177/2378023120967171) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/4.0/LEGALCODE)

UNITED STATES GOVERNMENT: 11. COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:JASON\_LEWIS\_OFFICIAL\_PORTRANT\_115TH\_CONGRESS.JPG; 14. COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:LINDA\_SANCHEZ\_116TH\_CONGRESS\_OFFICIAL\_PHOTO.JPG; PUBLIC DOMAIN  
 WIKI/FILE:JAMES\_CVIRBN\_OFFICIAL\_CONGRESSIONAL\_MAJORITY\_VMP\_PHOTO.JPG; 6. COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:STEVE\_JAMES\_OFFICIAL\_SENATE\_PORTRANT.JPG; 7. COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:JADAQUIN\_CASTRO\_OFFICIAL\_PHOTO.JPG; 8. COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:DANNY\_KAVINSKI\_113TH\_P.F.F. 10. COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:ROCHESTER\_OFFICIAL\_PHOTO.JPG; 12. COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:USA\_BUMT\_ROCHESTER\_OFFICIAL\_PHOTO.JPG; 13. COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:JASON\_LEWIS\_OFFICIAL\_PORTRANT\_115TH\_CONGRESS.JPG; 14. COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:LINDA\_SANCHEZ\_116TH\_CONGRESS\_OFFICIAL\_PHOTO.JPG; PUBLIC DOMAIN

**GESCHLECHTLICHE UNTERSCHIEDE Emotionale KI-Programme erkennen Lächeln bei Männern seltener als bei Frauen. Die prozentualen Angaben zu Merkmalen in den äußersten rechten Bildern der oberen beiden Reihen zeigen, wie sicher sich die KI mit ihren Zuordnungen ist. Die Frau wurde unter anderem mit 64 Prozent Sicherheit als »lächelnd« eingestuft, während diese Bezeichnung beim Mann gar nicht erst auftauchte.**

was wäre, wenn wir mit Hilfe von Computer-Vision die gleichen Analysemöglichkeiten auch für den Offline-Handel hätten?»

Im Dezember 2020 kündigte VSBLTY eine Partnerschaft mit der mexikanischen Brauerei Grupo Modelo an, bei der sie in den nächsten sieben Jahren Kameras in 50 000 lateinamerikanischen Modelorama-Brauerei-Märkten zur Datenerfassung aufbauen wird. Die Technologie werde künftig in Verkehrsknotenpunkten, Flughäfen oder Stadien eingesetzt, prognostiziert Hutton. »Werbetreibende zahlen Millionen von Dollars, um als Sponsor aufzutreten, und ihre Werbung erscheint auf Bildschirmen im ganzen Stadion. Natürlich möchten sie wissen, ob sich der Einsatz lohnt.«

Dieser Trend wirft eine fundamentale rechtliche Frage auf: Gehören die Gesichts- und Körperdaten der betreffenden Person? In den meisten Ländern der Welt lautet die Antwort: Nein – solange die Identität von den Daten getrennt bleibt. »Wenn sich jemand in einer öffentlichen Umgebung befindet, kann man die Person ohne Schwierigkeiten nach ihren Emotionen scannen«, erklärt die Rechtswissenschaftlerin Jennifer Bard von der University of Cincinnati.

### **Im öffentlichen Raum darf spioniert werden**

Die meisten KI-Firmen beteuern, die gesammelten Informationen zu anonymisieren, weshalb ihre Erfassung keinen Anlass zur Sorge geben sollte. Zum Beispiel speichert VSBLTY keine Bilder von Gesichtern oder andere Daten, mit denen man jemanden identifizieren könnte, so Hutton. Moutafis von Zenus weist darauf hin, die App seines Unternehmens lade nicht die eigentlichen Aufnahmen hoch, sondern nur die relevanten Metadaten. »Eine ausdrückliche Zustimmung ist nicht erforderlich«, erklärt er. »Unter Umständen muss man höchstens ein Schild anbringen, dass ein Bereich überwacht wird.« Normalerweise, äußert Moutafis, haben die Leute nichts dagegen und vergessen die Kameras sofort. Aber durch die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten gibt es keine gemeinsamen Standards. Zudem ist alles andere als klar, ob die Menschen und die Gesetzgebung eine solche Routineüberwachung weiterhin akzeptieren, wenn sie zu einem politischen Thema wird.

Ekman, der früher mit Apple und dem Unternehmen Emotient an emotionalen KI-Systemen gearbeitet hat, warnt nun, die Technologie stelle eine Bedrohung für die Privatsphäre dar. Ihm zufolge sollten Firmen gesetzlich verpflichtet sein, die Zustimmung jeder Person einzuholen, die sie scannen. »Leider kann die Technologie völlig problemlos eingesetzt werden, ohne dass die Betroffenen das merken –

und zwar nicht, um diejenigen glücklicher zu machen, sondern um sie zum Kauf von Produkten zu bewegen, die sie sonst vielleicht nicht kaufen würden. Und das ist wahrscheinlich einer der harmlosesten Verwendungszwecke der Technologie.«

Emotionale KI ist inzwischen auch in den persönlichen Bereich vorgedrungen, wo die potenzielle Datenmenge noch viel größer ist. Alexa von Amazon analysiert beispielsweise die Stimmlage der Nutzer auf Anzeichen von Frustration, um ihre Algorithmen zu verbessern, so ein Sprecher. Bis 2023 führen einige Autohersteller KI-fähige Systeme in ihren Fahrzeugen ein, die zahlreiche Informationen über das Fahrverhalten sammeln. Die Automobilhersteller möchten diese (vermutlich anonymisierten) Daten unter anderem nutzen, um die Systemreaktionen und das Fahrzeugdesign zu verfeinern sowie um das allgemeine Verhalten wie den Fahrstil zu bestimmen. Tesla sammelt schon jetzt solche Informationen.

Der Experte für Computer-Vision Aleix Martinez von der Ohio State University verdeutlicht seine Bedenken gegen die Technologie mit einem Foto. Es zeigt das Gesicht eines Mannes, das in einer Mischung aus Wut und Angst verzogen zu sein scheint. Dann enthüllt er das vollständige Bild. Es ist ein Fußballspieler, der nach einem Tor jubelt. Mimik, Gestik und andere Signale sind nicht nur ein Produkt des Körpers und des Gehirns, sondern auch des Kontextes – all dessen, was um eine Person herum geschieht. Das habe sich bisher als die größte Herausforderung für emotionale KI-Systeme erwiesen: mehrdeutigen Kontext zu interpretieren. »Wenn ich nicht weiß, was Fußball ist, werde ich nie verstehen können, was auf dem Bild passiert«, erklärt Martinez. »Dieses Wissen ist also von grundlegender Bedeutung, und wir haben im Moment kein KI-System, das so etwas gut kann.«

Die Technologie wird effizienter, wenn die Aufgabe gut abgesteckt ist, die Umgebung simpel und die gesammelten biometrischen Daten vielfältig – Stimme, Gesten, Puls, Durchblutung der Haut und so weiter. Künftige KI-Generationen könnten genau diese Art von Informationen miteinander kombinieren. Andererseits wird das zu noch leistungsfähigeren Anwendungen führen, auf die unsere Gesellschaft möglicherweise ebenso wenig vorbereitet ist. ◀

### **QUELLEN**

**Barrett, L. F. et al.:** Emotional expressions reconsidered: Challenges to inferring emotion from human facial movements. *Psychological Science in the Public Interest* 20, 2012

**Jack, R. E. et al.:** Facial expressions of emotion are not culturally universal. *PNAS* 109, 2012

**Laajaj, R. et al.:** Challenges to capture the big five personality traits in non-WEIRD populations. *Science Advances* 5, 2019

**Picard, R. W.:** Affective computing. MIT Media Laboratory Perceptual Computing Section Technical Report 321, 1995

**Schwemmer, C. et al.:** Diagnosing gender bias in image recognition systems. *Socius: Sociological Research for a Dynamic World* 6, 2020

**Stanley, J.:** The dawn of roboter surveillance. *American Civil Liberties Union*, 2019

# REZENSIONEN

ANDREY BERISAVSKIY / GETTY IMAGES / ISTOCK

Hans Jürgen Böhmer  
**BEIM NÄCHSTEN  
WALD WIRD ALLES  
ANDERS**  
Das Ökosystem  
verstehen  
S. Hirzel,  
Stuttgart 2022  
208 S., €24,-



**WALDSTERBEN**  
 Was wurde eigentlich aus dem in den 1980er Jahre prognostizierten Sterben des Walds?

## FORSTWIRTSCHAFT WENN MAN DEN WALD VOR LAUTER BÄUMEN NICHT SIEHT

Ein Landschaftsökologe erklärt das Waldsterben und die wirklichen Gefahren für die Zukunft unserer Waldökosysteme.

▶ In den 1980er Jahren sorgte das Waldsterben in Deutschland für Aufsehen, und jetzt, 40 Jahre später, sind viele Menschen wieder über den schlechten Zustand der heimischen Wälder beunruhigt. Mit plötzlichem und großflächigem Waldsterben steht Deutschland nicht allein da. Doch die Zusammenhänge sind weit komplexer und variabler, als der damalige Fokus auf den sauren Regen vermuten lässt. In seinem Buch »Beim nächsten Wald wird alles anders« räumt der Landschaftsökologe Hans Jürgen Böhmer

mit hartnäckigen Fehlurteilen auf und lenkt den Blick auf die Klimakrise, invasive Arten und strukturelle Probleme im Forstmanagement und in der Ökologieforschung.

»Was ist eigentlich aus dem Waldsterben geworden?« Diese an ihn gerichtete Frage, so Böhmer, habe letztlich zu dem aktuellen Buch geführt. Denn die in den 1980er Jahren prognostizierte Apokalypse der Wälder ist bekanntlich ausgeblieben. Grund genug, das damalige Phänomen mit heutigem Wissen zu betrachten. Sein Fazit nimmt der Autor schon im Vorwort vorweg: »Dies ist kein Weltuntergangsbuch, und insbesondere auch kein Walduntergangsbuch.« Vor Opti-

mismus sprüht das Werk jedoch ebenso wenig, so viel sei verraten.

Fachkundig und leicht verständlich trägt der Ökologe zusammen, was seine Fachrichtung seit den frühen 1980er Jahren herausgefunden hat. Er sucht nach Gemeinsamkeiten mit einem Waldsterben auf Hawaii, wo er selbst intensiv geforscht hat. Hier wie dort sowie andernorts waren schnell naheliegende Erklärungen gefunden – die sich später zwar als beteiligte Faktoren erwiesen, aber nicht als Hauptursache. Mal sei es saurer Regen, der das Fass zum Überlaufen bringt, mal ein Schadpilz, mal das natürliche Lebensende einer großen gleichzeitig entstandenen Baumkohorte. »Waldsterben« und »neuartige Waldschäden« seien daher »irreführende Sammelbegriffe für ungefähr zeitgleich ablaufende, regional allerdings sehr unterschiedliche Typen von Baumerkrankungen«.

Trotzdem verbindet die Phänomene eine meist schon länger unentdeckt wirkende Gemeinsamkeit. Böhmer zufolge sind es fast immer veränderte Niederschlagsmuster – extreme Dürren oder manchmal zu viel Nässe –, an die manche Baumarten nicht angepasst sind. Bei genauem Hinsehen sterbe nicht jeder Wald, sondern Populationen bestimmter Arten.

Besonders groß sei diese Anfälligkeit in Forsten, in Deutschland beispielsweise in Fichtenwäldern, da Fichten ihre natürliche Heimat eigentlich erst oberhalb von 600 Höhenmetern haben. Der Autor spricht daher auch von »Forststerben«, weil naturbelassene deutsche Wälder weit weniger betroffen sind. »Der anhaltende Glauben an den sauren Regen als Auslöser des Waldsterbens ist ein zweischneidiges Schwert«, kritisiert Böhmer. »Einerseits sensibilisiert er für die ernst zu nehmende Problematik von Luftschadstoffen, andererseits verstellt er den Blick dafür, wie lange schon die Folgen der Erderwärmung viele Wälder unter Stress setzen und wie lange schon wir uns um einen angepassten Waldumbau hätten kümmern können und sollen.«

Seine Aussagen belegt der Ökologe stets durch eigene und fremde For-

schung. Das gilt ebenso für den zweiten Teil des Werks, in dem er sich mit der Frage beschäftigt, wohin sich der Wald verändert. Dabei betont Böhmer mehrfach, so genannte Waldsterben gehörten zu den Lebenszyklen – bloß seien die Zeiträume, auf die wir Menschen schauen, oft zu kurz, um das wahrzunehmen. Viele Wälder haben sich auf natürliche Weise regenerieren können.

Wie das Buch allerdings auch aufzeigt, schädigt der Klimawandel die Wälder in einer Häufigkeit und Intensität, die dazu führen, dass sich die Ökosysteme in ihrer Zusammensetzung verändern – mit unbekanntem Folgen. »Alle Daten deuten darauf hin, dass bei erwartbaren häufigeren Dürren in der Zukunft der Wassermangel in den Landschaften länger anhält und dann irgendwann keine ausreichenden Erholungsphasen für die Bäume mehr stattfinden.« Zusätzlich erleichtert der Klimawandel das Eindringen invasiver Arten, die in einem geschwächten Ökosystem schnell zur dominierenden Art werden und das etablierte Gleichgewicht zerstören können. Ein gutes Forstmanagement sollte daher auf einheimische, trocken-tolerante und an den jeweiligen Standort angepasste Arten setzen, lautet nur einer der Tipps, die der Ökologe präsentiert.

Böhmer beendet sein Buch mit einer Kritik am Wissenschaftssystem. Gerade Ökologie verlange, sich intensiv mit den jeweiligen Ökosystemen zu befassen und sich lange darin aufzuhalten. Viele Publikationen in kurzer Zeit – und damit wissenschaftliches Renommee nach heutigem Maß – ließen sich so nicht erzielen. Folglich würden wichtige Projekte niemals unternommen, wenn sie zu aufwändig erscheinen. Und der Fokus auf englischsprachige Datenbanken führe dazu, dass Forschung auf Deutsch oder Französisch vergessen werde, wodurch Ressourcen in die Erforschung von Fragestellungen fließe, die schon vor 10 oder 20 Jahren beantwortet wurden.

Unterm Strich bleibt ein gut lesbarer, erhellender und aus der Praxis gespeister Einblick in die komplexe

Ökologie von Wäldern mit Sensibilität auf der einen und Resilienz auf der anderen Seite. Ob die Kapitel über invasive Arten – ein Steckenpferd des Autors – und den Wissenschaftsapparat so lang hätten ausfallen müssen, kann man hinterfragen. Der Bezug ist jedenfalls gegeben, und aufschlussreich sind sie durchaus.

Björn Lohmann ist Wissenschaftsjournalist in Essen.



## KOSMOLOGIE MITARBEIT GEFRAGT

**Der Physiker Luciano Rezzolla liefert in seinem neuen Buch eine anspruchsvolle Einführung in die wundersame Welt der Schwerkraft.**

► Mal wieder ein Buch über Schwarze Löcher. Kann das überhaupt noch interessant sein? Und ob! Denn Autor ist der in Frankfurt lehrende Physikprofessor Luciano Rezzolla, dessen Gruppe am Event Horizon Telescope mitarbeitet. Diese internationale Kollaboration hat 2019 das Bild von M87\*, dem Schwarzen Loch im Zentrum der Galaxie M87, veröffentlicht. Das Ergebnis ist zwar ziemlich unscharf, ging aber wie ein Lauffeuer um die Welt.

Wie versprochen, widmet sich Rezzolla in den ersten vier Kapiteln der Schwerkraft: wie wir sie erfahren, wie sich unser wissenschaftliches Verständnis davon entwickelt hat und wie sie in der aktuell vorherrschenden Theorie, der allgemeinen Relativitätstheorie, beschrieben wird. Dazu diskutiert der Autor zunächst die linke Seite der einsteinschen Feldgleichungen,

welche die Geometrie der Raumzeit beschreibt. Im Anschluss kommt er zur rechten Seite, wie also Materie den Raum krümmt. Es folgt ein Kapitel über Neutronensterne, bei denen die Schwerkraft unglaublich stark ist, die es aber gerade noch schaffen, nicht zu einem Schwarzen Loch zu kollabieren. Letztere sind dann Thema im sechsten Abschnitt. Der darauf folgende berichtet von M87\* und dem berühmten Bild. Am Schluss beschäftigt sich der Autor schließlich mit Gravitationswellen, die seit 2015 regelmäßig aufgezeichnet werden.

Interessant ist vor allem das ungewöhnliche Niveau: Mitdenken ist erforderlich. Der Autor verzichtet beispielsweise nicht gänzlich auf Formeln, sondern verwendet an einigen Stellen Gleichungen, bei denen es weniger auf die Details ankommt als auf die darin beschriebenen Verhältnisse. So tritt etwa in der Relativitätstheorie häufig der Quotient aus der Masse eines

Objekts zu seiner Ausdehnung auf – die so genannte Kompaktheit. Die Raumzeit-Krümmung und damit die Stärke der Schwerkraft ist direkt proportional dazu. Durch diese mathematische Schärfe schafft es Rezzolla, präziser als die meisten populärwissenschaftlichen Bücher zu erklären, wie die einsteinsche Theorie funktioniert. Der Autor gibt unumwunden zu, dass sein Werk aktives Mitdenken erfordert, aber die einfache Begründung dafür ist: Das macht es ja gerade spannend.

Außerdem sind die beiden letzten Kapitel allein schon deshalb interessant, weil sie aktuelle Forschungsthemen diskutieren. Wie das M87\*-Bild entstand und was uns Gravitationswellen verraten, sind Beispiele dafür, dass die Relativitätstheorie trotz ihres über 100-jährigen Daseins keineswegs zum alten Eisen gehört. Leider behandelt Rezzolla jedoch nicht das Schwarze Loch Sgr A\* im Zentrum der Milchstra-

ße, dessen Entdecker mit dem Physik-Nobelpreis 2020 geehrt wurden. Dabei ist sich die Forschergemeinde bei diesem bereits seit 2002 viel sicherer als bei M87\*, dass dort tatsächlich ein Schwarzes Loch sitzt.

Zudem haben sich im Buch eine ganze Reihe von Ungenauigkeiten eingeschlichen. Beispiele dafür sind: Bei der Merkurpräzession versäumt Rezzolla es, zu erwähnen, dass die anderen Planeten des Sonnensystems eine zwölfmal größere Periheldrehung verursachen als der Unterschied zwischen Isaac Newtons und Einsteins Theorien. Oder: Die EHT-Beobachtungswellenlänge von 1,3 Millimetern ist keineswegs die kürzestmögliche Wellenlänge, wie im Buch zu lesen ist. Rund 600-mal kürzere Wellenlängen (im Infraroten) kann man ebenso zur Interferenz bringen – allerdings nicht über genügend große Distanzen, um die nötige räumliche Auflösung zu erhalten. Zudem verhaspelt sich der



**SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT**

**JAHRGANG 2021**

— CD-ROM —

Die **Spektrum**-CD-ROM enthält den kompletten Inhalt (inklusive Bildern) des Jahrgangs 2021 von **Spektrum** der Wissenschaft als PDF-Version. Die Artikel sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken.

Zur besseren Nutzung Ihres Heftarchivs finden Sie auf der CD zusätzlich das Register von 1978 bis 2021 als PDF-Datei.

Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland). Erscheinungstermin ca. Anfang April

Tel. 06221 9126-743  
[service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)  
[Spektrum.de/sammeln](https://www.spektrum.de/sammeln)

# REZENSIONEN

Autor bei der Erklärung, wie Interferometrie funktioniert: Es klingt, als sei die Verstärkung der Radiosignale in einem konstruktiven Interferenzberg der Grund, warum man Teleskope kombiniert. Das ist falsch. Tatsächlich ist es das Auftreten der Interferenz, also von Bergen und Tälern der Intensität, was die hochauflösende Bildinformation trägt.

Wohl korrekt, aber leider etwas unverständlich, bleiben die Bemühungen des theoretischen Physikers, die Photonenbahnen um ein Schwarzes Loch zu beschreiben. Denn das Schaubild findet sich auf einer anderen Seite und fällt zudem ziemlich klein aus. An diesen Stellen wird dem Leser unnötig viel Konzentration abverlangt, größere Grafiken und eine bessere Platzierung von Text und Bild würden diese Abschnitte deutlich lesbarer machen.

Insgesamt hat Rezzolla ein lesenswertes Werk vorgelegt, das sich für alle lohnt, die sich nicht davor scheuen, beim Lesen mitzudenken.

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

## ZOOLOGIE INTELLIGENTE TIERE

**Welche Lebewesen haben ein Bewusstsein? Dieser umstrittenen Frage widmet sich der Autor und präsentiert den aktuellen Kenntnisstand.**

Der Biologe Ludwig Huber leitet die Abteilung für vergleichende Kognitionsforschung an der Universität Wien. Dabei hat er sich auf die kognitiven und emotionalen Fähigkeiten von Tieren spezialisiert. In seinem neuen Buch, einer Bestandsaufnahme des Gebiets, stellt er Befunde aus kontrollierten wissenschaftlichen Untersuchungen vor, die sich deutlich von den zufälligen Alltagsbeobachtungen, die wir machen, abheben.

In dem umfangreichen Text beschreibt der Autor ausführlich, wie Fachleute aus der Biologie, Verhaltensforschung und Psychologie vorgehen, um die kognitiven Fähigkeiten von



Tieren zu untersuchen. In einem anschließenden Literaturverzeichnis finden sich fast 1200 Referenzen, die es erlauben, Details hierzu in Fachartikeln nachzulesen.

Die Frage, ob Tiere rational handeln können, teilt Huber in sechs Themengruppen auf: die kreative Herstellung und der Gebrauch von Werkzeugen; die technische Intelligenz und das Kausalverständnis; die Vorbereitung und Planung von Handlungen; das episodische Gedächtnis, in dem Ereignisse in der Vergangenheit abgespeichert sind; die Metakognition, das Nachdenken über den eigenen Wissensstand und zuletzt das »Sich-in-andere-hineinversetzen-Können« und die Perspektivenübernahme. Diese Fähigkeiten definieren laut Huber rationales Denken.

Der Autor stellt anschaulich dar, wie man die komplexen Vorgänge bei Tieren untersuchen kann, um zu eindeutigen und verlässlichen Ergebnissen zu gelangen. Dabei schildert er seine Grundgedanken ausführlich und nachvollziehbar. Detailliert erklärt er die meist aufwändigen Experimente. Durch mehrere Abbildungen veranschaulicht Huber die wichtigsten Beobachtungen und vermittelt, welche Leistungen Affen, Krähen, Delfine und Hunde oder auch Bienen, Pfeilgiftfrösche, Schildkröten sowie Kraken vollbringen. Manche dieser Fähigkeiten entsprechen erstaunlicherweise denen von Kleinkindern.

Zudem ordnet Huber die Ergebnisse in einen größeren Zusammenhang ein. Schließlich ist die Frage, ob Tiere ein Bewusstsein haben, eine der umstrittensten und spannendsten in der

Biologie und der vergleichenden Psychologie. Die Thematik wurde in der Vergangenheit oft als etwas abgetan, über das man eigentlich nichts wissen könne. Viele Fachleute befürchteten, damit sei die Besonderheit des Menschen als *Homo habilis* gefährdet, denn vor allem die Herstellung und Verwendung von Werkzeugen wurde häufig als abgrenzendes Merkmal vom Tierreich angesehen. Nach dieser Ansicht stellt der Nachweis des tierischen Bewusstseins die Sonderrolle des Menschen in Frage.

Allerdings hatte der US-amerikanische Biologe Donald R. Griffin bereits vor mehr als 50 Jahren argumentiert, dass man menschenähnliche Kognition bei Tieren als evolutionären Vorteil sehen müsste: Sie wäre nicht entstanden, wenn sie keine überlebensfördernden Funktionen hätte. Ursprünglich diente sie wahrscheinlich dazu, sich bewusst zu bewegen, die Aufmerksamkeit besser auf die Umwelt auszurichten und zu fokussieren, was wichtig für das Überleben ist.

Selbst wenn manche Tiere einige Eigenschaften des menschlichen Bewusstseins haben, besitzen Menschen darüber hinaus weitere Fähigkeiten. Diese Punkte diskutiert Huber ebenfalls unter Aspekten der Psychologie und philosophischen erkenntnistheoretischen Gedanken.

Er schlussfolgert, dass wir unseren Umgang mit Tieren überdenken müssen: »Erkenntnis und Moral sollten Hand in Hand gehen, und wir sollten neben dem wissenschaftlichen und technischen Fortschritt auch den moralischen fördern.« Dies ist im Sinn der Aussage von Mahatma Gandhi: »Die Größe und den moralischen Fortschritt einer Nation kann man daran messen, wie sie die Tiere behandelt.«

Zusammenfassend hat Huber einen anspruchsvollen und gut lesbaren Text geliefert, der den aktuellen Forschungsstand über die kognitiven Fähigkeiten von Tieren ausführlich darstellt und angemessen diskutiert.

Wolfgang Skrandies ist Professor für Physiologie an der Justus-Liebig-Universität Gießen sowie an der Dokkyo Medical University in Japan.

## GESCHICHTE DER LANGE WEG ZUM FRIEDEN

**Der Nahostkonflikt zählt zu den verfahrensten Situationen der heutigen Zeit. Ein ehemaliger israelischer Geheimdienstchef offenbart seine Gedanken und Erinnerungen zu dem gespaltenen Verhältnis zweier Parteien.**

Im Mai 2021 geschah es erneut: Die Hamas schoss von Gaza aus Granaten auf israelische Städte, während die Israelis ihrerseits mit einem Bombardement des schmalen, isolierten Küstenstreifens reagierten. Nach mehr als 70 Jahren seit der Staatsgründung Israels ist der Nahostkonflikt einer Lösung offenbar kein Stück nähergekommen.

Dabei gab es in der Geschichte immer wieder Annäherungen und Bestrebungen, zumindest teilweise

aufeinander zuzugehen und einen Friedensvertrag auszuarbeiten. Doch alle Versuche sind bislang gescheitert.

An vielen dieser zahlreichen Schlüsselereignisse der letzten Jahrzehnte war Ami Ajalon, der ehemalige Direktor des israelischen Inlandgeheimdienstes Schin Bet, direkt oder zumindest indirekt beteiligt. In »Im eigenen Feuer« schildert Ajalon seine Erinnerungen daran und erklärt, wie sich seine Sichtweise auf die Problematik mit den Jahren gewandelt hat.

Die Erwartung, dass das Buch eines ehemaligen Elitesoldaten und Geheimdienstchefs eine einseitige, proisraelische Sicht auf die Thematik wirft, täuscht: Ajalon kritisiert die israelische Politik hart und versucht, sich immer wieder in die Lage der in die Ecke gedrängten Palästinenserinnen und Palästinenser zu versetzen. Damit erhält man einen differenzierten Blick auf einen der hartnäckigsten Konflikte der aktuellen Zeit.

Bevor Ajalon, der sich weder als politisch links oder rechts eingestellt betrachtet, zu diesem breit gefächerten Blick in der Lage war, lebte er das Leben eines »vorbildlichen« Patrioten: Er wuchs in einem Kibbuz auf, absolvierte den Wehrdienst und landete bei der Eliteeinheit der israelischen Marine, der Schajetet 13, vergleichbar mit den Navy SEALs. Dort hinterfragte er keine politischen Entscheidungen, sah Palästinenser meist als Feinde.

Ami Ajalon,  
Anthony David  
**IM EIGENEN  
FEUER**

Wie Israel sich selbst zum Feind wurde und die jüdische Demokratie trotzdem gelingen kann  
Dietz, Bonn 2021  
360 S., € 26,-



# Spektrum.tv

## Dokumentationen und Reportagen zu den Tophemen der Wissenschaft

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

[tv.spektrum.de/DE/](https://www.tv.spektrum.de/DE/)



Doch je weiter er aufstieg, desto mehr wandelte sich sein Weltbild – bis er immer vehementer für eine für beide Konfliktparteien zufrieden stellende Zwei-Staaten-Lösung eintrat. Das gipfelte Anfang der 2000er Jahre in der Friedensinitiative »People's Voice«, die er gemeinsam mit dem palästinensischen Philosophen Sari Nusseibeh gründete.

Der Autor schildert immer wieder die zermürbenden Diskussionen mit unterschiedlichen Politikern, unter anderem während seiner Zeit als Direktor des Schin Bet: wie er versuchte, sie zu Kompromissen zu bewegen, um guten Willen zu zeigen, und wie sie seinen Rat – und den anderer – immer wieder ignorierten. Seine Bemühungen führten schließlich zu dem Versuch, selbst eine politische Karriere zu beschreiten, die er inzwischen aber aufgegeben hat.

Der Autor geht in seinem Werk sowohl mit Israel als auch mit sich hart ins Gericht. Er schildert, wie er, ohne es zu hinterfragen, sich auf jahrtausendealte Geschichte bezog, um seinen Anspruch auf das Heilige Land zu rechtfertigen. Viele versäumten es aber, betont er, sich mit der weitaus kürzer zurückliegenden Vergangenheit zu identifizieren: jene der Juden, die in der Diaspora lebten – der Geschichte ihrer Eltern oder Großeltern.

Durch zahlreiche Gespräche mit Freunden, Verwandten, Gelehrten und Schriftstellern kommt Ajalon zu dem Schluss, weshalb Israel »im eigenen Feuer« gefangen sei: »Als Einzelne sind wir Israelis Bürger einer Start-up-Nation, Optimisten mit einer zupackenden Haltung. Aber in unserem Gemeinwesen – in unserem Wahlverhalten, unseren militärischen Taktiken und im Gefühl für unseren Platz in der Welt – herrscht die Angst.« Dies sei der Grund, warum Israel, trotz seiner militärischen Überlegenheit, im Patt mit den Palästinensern gefangen sei.

Das Buch bietet eine überaus interessante und differenzierte Sichtweise auf den Nahostkonflikt und belegt viele Aussagen und Berichte mit Referenzen, die in einem umfangreichen Literaturverzeichnis nachzuschlagen sind. Zudem verweist Ajalon

immer wieder auf sehr empfehlenswerte Werke, unter anderem die des israelischen Schriftstellers Amos Oz, des Haaretz-Journalisten Avi Shavit oder die Autobiografie von Sari Nusseibeh. Wer allerdings bisher erst wenig über die historischen Hintergründe des Konflikts weiß, muss womöglich häufiger einige der genannten Ereignisse nachschlagen, da der Autor die Zusammenhänge oft nur kurz anreißt.

Manon Bischoff ist Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.



## INFORMATIK RAUS AUS DER SCI-FI-ECKE

**Künstliche Intelligenz ist inzwischen ein integraler Bestandteil unseres alltäglichen Lebens – ob wir uns dessen bewusst sind oder nicht. Deshalb sei es wichtig, zumindest die Grundlagen dieser Technologie zu verstehen, meint der Autor.**

► Sven Krüger ist studierter Kunsthistoriker, seit Längerem Manager im IT-Bereich, Unternehmensberater und Gründer eines IT-Start-ups, also kein Wissenschaftler oder Softwareentwickler, wie er selbst betont. Er will mit diesem Buch erklären, »warum künstliche Intelligenz für alle relevant ist und dass es sinnvoll ist, sich mit dem Thema persönlich etwas auszukennen«. Sein Stil ist sehr ausführlich, trotzdem lebendig. Komplizierte Formulierungen vermeidet Krüger, das Buch ist also für jeden verständlich.

Zudem ist es als Nachschlagewerk perfekt geeignet, man kann die einzelnen Abschnitte unabhängig voneinander lesen – doch dadurch finden sich auch immer wieder Dopplungen, weil gewisse Sachverhalte an mehreren Stellen für den besprochenen Inhalt wichtig sind. Und schon vorweg: Wer einen wirklich vollständigen Überblick über den aktuellen Stand des Themas sucht, ist mit dem Buch gut bedient.

In den ersten Abschnitten schildert Krüger sehr anschaulich unter Angabe vieler wirtschaftlicher Daten, welche Bedeutung die Informationstechnik in Deutschland und der Welt aktuell hat. Er beschreibt, wie rasant sich die Digitalisierung im letzten Jahrzehnt entwickelt hat und vor allem wie künstliche Intelligenz (KI) der Bestandteil vieler digitaler Technologien geworden ist. Dazu führt er zahlreiche Beispiele an und stellt an einem Smartphone dar, welche Funktionen auf KI-Verfahren beruhen. Dadurch sei in den letzten Jahren »ein KI-Hype mit jeder Menge Dystopie und Hysterie in den Medien« entstanden. Mit seinem Buch will er die KI »entmythologisieren und aus der Sciencefiction-Ecke« herausholen.

Nach einem kurzen Überblick über die Geschichte der KI-Forschung, von Alan Turing über Weizenbaums Software Eliza bis hin zu Sprachassistenten wie Siri oder Alexa, skizziert Krüger knapp, welche Ideen hinter neuronalen Netzen und maschinellem Lernen stecken. Der Erfolg dieser schon länger existierenden Ansätze hielt erst im neuen Jahrtausend Einzug – zum einen dank der Hardware, die mit schnelleren Prozessoren und größeren Speichern komplexe neuronale Netze ermöglicht. Zum anderen beruht der Erfolg auf der wachsenden und preiswert vorhandenen Menge an Trainingsdaten, welche die globale Internetgemeinde selbst erzeugt, indem sie Inhalte hochlädt. Diese Daten braucht man für das maschinelle Lernen, ohne das die zu Grunde liegende Software wertlos ist – was den »unstillbaren Datenhunger von Unternehmen« erklärt.

Ausführlicher geht Krüger auf die Grundlagen der natürlichen Sprachver-

## In den letzten Jahren entstand ein Hype mit jeder Menge Dystopie und Hysterie

arbeitung (kurz: NLP, natural language processing) und der Erzeugung von Grafiken und Filmen (mit Hilfe von GANs, generative adversarial networks) ein, die er für die bedeutendsten Entwicklungen der letzten Jahre hält. Wichtige Anwendungsbereiche heutiger KI-Algorithmen seien neben der Sprachsteuerung und Bilderkennung die Empfehlungsalgorithmen, die man von Anbietern wie Amazon oder Netflix kennt.

Ein anderes Thema, dem sich der Autor intensiv widmet, sind die Unterschiede von Computern und dem

menschlichen Gehirn. Insbesondere geht er der Frage nach, ob man einer KI ein Bewusstsein zusprechen kann. Auf 75 weiteren Seiten diskutiert er – etwas zu ausführlich –, ob und wann eine KI dem Denkkorgan nicht nur ebenbürtig, sondern überlegen sein wird. Krügers Fazit: Trotz der erstaunlichen aktuellen KI-Software, die komplexe Probleme lösen kann, handelt es sich doch stets um eine eingeschränkte Art der Intelligenz. Diese kann uns zwar in einem bestimmten Bereich übertreffen, ist aber von den allgemeinen Fähigkeiten eines Menschen weit entfernt.

200 Seiten, ein Drittel des Buchs, stellt der Autor unter die Überschrift »KI und Verantwortung«. Allein der Umfang zeigt, dass Krüger die gesellschaftspolitische Bedeutung von KI am Herzen liegt. Die Einsatzfelder der Technologie reichen schon heute in nahezu alle Bereiche des Lebens: von der Medien- und Unterhaltungsindustrie, Finanzwirtschaft, Biotechnologie und dem Bildungssystem über die

öffentliche Verwaltung, Kommunikationsmedien bis hin zu Geheimdiensten. KI-Auswertungen werden Grundlage vieler Entscheidungen, etwa bei Bewerbungsprozessen oder Gerichtsurteilen. Deshalb ist es wichtig zu wissen, wer für die Software verantwortlich ist und welcher Input zum Trainieren des neuronalen Netzes verwendet wurde. In den USA hat man beispielsweise KI-Programme zur Verhaltenserkennung eingesetzt, um die Aggression und Gewalt in Städten zu prognostizieren und einzudämmen. Dabei zeigte sich jedoch, dass die Software menschliche Vorurteile bezüglich Rasse oder Geschlecht reproduzierte, die – zunächst unerkannt – in den Trainingsdaten enthalten waren.

Weitere Probleme ergeben sich, wenn man KI bei der autonomen Steuerung von Fahrzeugen oder Waffensystemen einsetzt. Wer trägt die Verantwortung, wenn es um Menschenleben geht? Und wie soll sich eine KI bei einem moralischen

## Spektrum der Wissenschaft

**Chefredaktion:** Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

**Redaktionsleitung:** Dr. Hartwig Hanser

**Redaktion:** Manon Bischoff, Dr. Andreas Jahn, Dr. Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang, Mike Zeitz (stellv. Redaktionsleiter); E-Mail: [redaktion@spektrum.de](mailto:redaktion@spektrum.de)

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

**Layout:** Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Natalie Schäfer

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

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

**Redaktionsassistent:** Andrea Roth

**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle

**Herstellung:** Natalie Schäfer

**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

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

**Übersetzungen:** An diesem Heft wirkte mit: Christine Kemmet

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: [spektrum@zenit-presse.de](mailto:spektrum@zenit-presse.de), Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

**Bezugspreise:** Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,-; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,-, PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

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

**Anzeigen:** E-Mail: [anzeigen@spektrum.de](mailto:anzeigen@spektrum.de), Tel.: 06221 9126-600

**Druckunterlagen an:** Natalie Schäfer, E-Mail: [schaefer@spektrum.de](mailto:schaefer@spektrum.de)

**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 43 vom 1.1.2022.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2022 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

**SCIENTIFIC AMERICAN**

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562  
Editor in Chief: Laura Helmut  
Executive Vice President: Michael Floreac  
President: Kimberly Lau



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



# REZENSIONEN

Dilemma verhalten? Für die Entwicklung einer KI-Ethik hält es der Autor für unerlässlich, dass die Software transparenter wird.

Die interne Struktur neuronaler Netze lässt bisher oft nicht durchblicken, wie das Ergebnis zu Stande kommt. Um mehr Transparenz zu erreichen, hat eine Expertenkommission der EU Rückverfolgbarkeit, Erklärbarkeit und Kommunikation gefordert. Letzteres bedeutet, dass sich eine KI Menschen gegenüber als Maschine zu erkennen gibt. Bemühungen dazu gibt es neben der EU in den USA sowie bei einigen IT-Unternehmen.

Viele weitere Themen aus dem ersten Teil des Buchs, etwa Roboter und die Veränderung der Arbeitswelt, Chatbots, KI in Gesundheitswesen und Medizin, Gesichtserkennung, Überwachungsstaat und Datenschutz, greift Krüger ebenfalls auf und handelt sie unter ethischen und gesellschaftlichen Blickwinkeln ausführlich ab. Er wirft dabei auch viele Fragen auf, die im Sinn eines Gesellschaftsvertrags gelöst werden müssen: »Wir sollten besser selber die Spielregeln festlegen, nach denen KI Entscheidungen fällt.« Eine intensive Auseinandersetzung mit dem Thema hält er für wichtig. In diesem Buch findet man die dafür nötigen Fakten sowie Meinungen und Vorschläge, die dabei helfen, dem nachzukommen.

Hartmut Weber war Mathematiklehrer in Kassel und rezensiert regelmäßig für die Deutsche Mathematiker-Vereinigung.

## NATURSCHUTZ KLEINER ADLER GANZ GROSS

**Deutschlands kleinster Adler ist auch der seltenste. Ein Bildband bietet eindrucksvolle Einblicke in sein Leben, aber leider ebenfalls in die Gefahren, denen der Schreiadler ausgesetzt ist.**

▶ Vor 200 Jahren lebte der Schreiadler wohl noch in weiten Teilen des heutigen Deutschland. Selbst im Süden und Südwesten der Bundesrepublik gab es Brutpaare. Heute

existieren die letzten rund 130 Paare ganz im Nordosten in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern. Sie sind der letzte Rest, der hier zu Lande noch überdauert, der aber zunehmenden Risiken ausgesetzt ist. Die kleine Zahl und der negative Trend machen den Schreiadler zur am stärksten bedrohten Adlerart Deutschlands, wie Thomas Krumenacker in seinem beeindruckenden und äußerst sachkundigen Bildband »König der Lüfte« schreibt: See-, Fisch- oder Steinadler nehmen dagegen dank strenger Schutzmaßnahmen zu oder bleiben zumindest im Bestand stabil.



Theoretisch gilt dieser Schutz auch dem Schreiadler, doch ist der Greifvogel empfindlicher und anspruchsvoller als seine Verwandten. Und sie sind noch mehr Gefahren ausgesetzt: Während beispielsweise See- oder Steinadler ganzjährig mehr oder weniger vor Ort bleiben, ziehen Schreiadler im Winter nach Süden. Zu Millionen holen Jäger unterwegs die Zugvögel mit Gewehren vom Himmel oder fangen sie mit Netzen und Leimruten. Auch Schreiadler trifft es immer wieder Dutzendfach, wie das Kapitel »Diethers letzte Reise« anhand eines besondern Vogels beschreibt.

Bei der Beschreibung der Gefahren scheut sich Krumenacker nicht, heiße Eisen anzufassen: Windkraftanlagen etwa rücken den verbliebenen Brutpaaren bedenklich nahe, wider den Empfehlungen von Ornithologen: Schreiadler geben Nistplätze auf oder werden durch Rotoren erschlagen. Dabei stellt sich der Autor nicht gegen diesen erneuerbaren Energieträger an sich, den er als essenziell für die Ein-

dämmung des Klimawandels betrachtet. Aber auch hier sollte gelten, dass man der Wissenschaft folgt: ausreichend Abstand zu Horsten, keinen Aufbau an wichtigen Flaschenhälsen der Vogelzugrouten. Schreiadler brauchen eine abwechslungsreich strukturierte Landschaft: alte Wälder mit geeigneten Brutbäumen neben offenem Kulturland bevorzugt mit Feuchtwiesen. Doch diese Lebensräume sind in Bedrängnis. Der Anbau von Mais oder Raps auf intensiv gedüngten und mit Pestiziden behandelten großen Ackerschlägen berauben den Adler seiner Jagdmöglichkeiten und Beute.

Dem Greif kommen Menschen jedoch ebenso zu Hilfe: Die Art pflegt einen ausgeprägten Kainismus – das ältere Geschwister tötet das jüngere nach dem Schlüpfen. Um den Bestand zu schützen, entnehmen Ornithologen den Nestern daher immer wieder das zweite Ei und ziehen die Küken möglichst naturnah groß, um sie später auszuwildern. Jedes Tier zählt mittlerweile.

Krumenacker erzählt diese Einblicke in das Leben der Adler detailreich und lebendig. Man merkt dem Buch an, dass sein Autor den Schreiadlern in Deutschland so nahesteht wie kaum ein anderer. Davon zeugen auch die zahlreichen hervorragenden Bilder der Adler, ihrer Heimat und der Tiere und Pflanzen, die sich mit den Greifen den Lebensraum teilen. Seine Leidenschaft für die Vögel führte Krumenacker zum Beispiel auch ins Baltikum, die Hochburg der Schreiadler, oder in den Nahen Osten, wo Jäger auf sie lauern und Vogelschützer ihre Bestände zählen.

»Könige der Lüfte« ist nicht nur ein Buch für Adlerkundige, sondern für jeden Menschen, der sich für die Natur und ihre Bewahrung interessiert. Man kann nur hoffen, dass dieses feine Werk das Interesse an den Schreiadlern weckt und endlich ihren Schutz verstärkt. Damit auch der kleinste Adler der Republik bald wieder einen Aufschwung wie die größere Verwandtschaft erfährt.

Daniel Lingenhöhl ist Chefredakteur von »Spektrum der Wissenschaft«, »Gehirn&Geist« und »Spektrum.de«.

## ZÖGERLICHE FORTSCHRITTE

**Ein neuer Beweis bringt die Fachwelt dazu, die mehr als 50 Jahre alte Auffassung zu überdenken, die Anzahl der Punkte auf dem Zahlenstrahl sei unbestimmbar ist.** (»Wie viele reelle Zahlen gibt es?«, »Spektrum« Januar 2022, S. 12)

**Lutz Muche, Freiberg:** Die Kontinuumshypothese ist allein mittels der ZFC-Axiome nicht entscheidbar. Dies ist doch ein akzeptables Ergebnis. Sie durch Hinzunahme weiterer plausibel erscheinender Axiome entscheiden zu wollen, kann je nach Wahl sowohl zu ihrer Bestätigung als auch zu ihrer Widerlegung führen.

Das jahrzehntelange Ringen und die sehr zögerlichen Fortschritte in der Frage sprechen eher dafür, dass mengentheoretisch-logische Argumente nicht ausreichen. Wäre es nicht naheliegender, die Eigenschaften der reellen Zahlen und deren Teilmengen mittels geeigneter Maße und Abbildungseigenschaften zu untersuchen und sich über diese Charakteristiken an die Kardinalzahlen heranzutasten?

**Martin Steins, per E-Mail:** Beim Lesen dieses interessanten Artikels ist mir als Nichtmathematiker die Frage gekommen, ob es möglich sein könnte, eine Funktion natürlicher Zahlen zu finden, aus der sich alle reellen Zahlen erzeugen lassen. Gefunden habe ich keine. Es scheint mir nur möglich, entweder die Unendlichkeit an Nachkommastellen oder die Unendlichkeit gewissermaßen im Vorkommabereich diskontinuierlich auszuloten – ein unendlich feines Übergleiten eines Nachkommabereichs über zwei Vorkommazahlen hinweg dürfte nicht funktionieren. Reellen Zahlen scheint eine zweidimensionale Unendlichkeit innezuwohnen, die durch eine eindimensionale Unendlichkeit der natürlichen Zahlen nicht vollständig abgebildet werden kann. Demnach scheint mir die Positionierung von Kurt Gödel mit der Annahme einer weiteren Unendlichkeit zwischen den natürlichen und den reellen Zahlen am ehesten schlüssig.

### Antwort der Redakteurin Manon Bischoff:

Eine Funktion darf jedem  $x$ -Wert (in dem Fall eine natürliche Zahl) höchstens einen  $y$ -Wert (eine reelle Zahl) zuordnen. Das heißt, die Funktion kann maximal jeder natürlichen genau eine reelle Zahl zuweisen – damit wären die reellen Zahlen abzählbar. Aus Cantors Diagonalargument folgt, dass es eine solche Funktion niemals geben kann.



## 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](mailto:leserbriefe@spektrum.de). Oder kommentieren Sie im Internet auf [Spektrum.de](http://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.

## NICHT DAS ERSTE FOTO

### Mit Hilfe eines Rastertunnelmikroskops ist die Aufnahme eines exotischen Elektronenmusters geglückt.

(»Erstmals Wignerkristalle abgebildet«, »Spektrum« Dezember 2021, Spektrumprogramm, S. 8)

**Wilfried Schoepe, Sinzing:** Wignerkristalle in zweidimensionalen elektronischen Zuständen auf flüssigem Helium wurden bereits 1979 von Charles C. Grimes and Gregory Adams entdeckt und nahezu gleichzeitig von Paul Leiderer und Manfred Wanner direkt beobachtet und fotografiert. Es ist sicher sehr interessant, dass es Wignerkristalle auch im zweidimensionalen Elektronengas des Graphen gibt. Der Titel des Beitrags sollte aber bescheidener lauten, zum Beispiel »Wignerkristalle im Graphen entdeckt«.

## LEIDIGES THEMA IN DER EVOLUTION

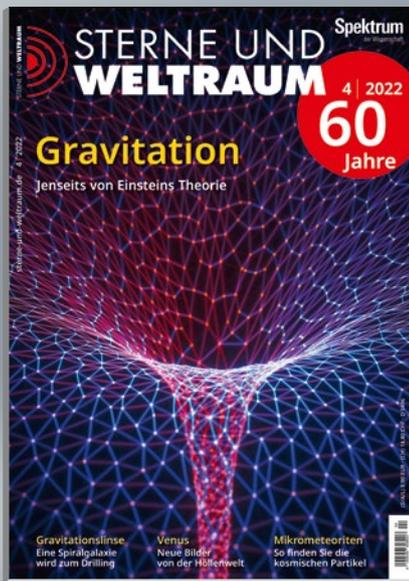
**Auch Wirbeltiere tauschen über »horizontalen Gentransfer« ihr Erbgut untereinander aus, ohne sich fortzupflanzen.** (»Gene springen über Artgrenzen hinweg«, »Spektrum« November 2021, Forschung aktuell, S. 22)

**Reinhold Glaab, per E-Mail:** Als Biologielehrer habe ich in über 30 Jahren, zugegebenermaßen mit wenig Erfolg, versucht, meinen Schülern ein wesentliches Grundprinzip in der Evolution zu vermitteln. Es geht um die häufige Frage: Warum haben Lebewesen bestimmte Eigenschaften, zum Beispiel Vögel Flügel? Bei populärwissenschaftlichen Veröffentlichungen ist die Antwort oft »damit sie fliegen können«, selbst in vielen Artikeln bei »Spektrum« (zuletzt gelesen im Artikel auf S. 22: »haben Meereslebewesen Mechanismen ausgeprägt, um mit den tiefen Temperaturen umzugehen«).

In der Evolution gibt es allerdings keine Absicht und kein konkretes Ziel. Die richtige Formulierung wäre vielmehr: »Weil die Vögel Flügel haben, können sie fliegen.« Mehr oder weniger zufällig entstandene Eigenschaften ermöglichen unter Umständen neue Fähigkeiten, aber es gab dafür nie einen Plan. Es ist schade, dass die falsche Sichtweise mit Fragen nach dem Warum und Begriffen wie »damit« und »um« nach wie vor, auch bei Fachleuten, weit verbreitet ist. Das vermittelt für mein Verständnis ein völlig falsches Bild.

# Unsere Neuerscheinungen

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



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

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

## REKORDFLUG VON LONDON NACH PARIS UND ZURÜCK

# 1922

»Der lebhafteste Luftverkehr zwischen der französischen und englischen Hauptstadt zeigt immer neue Rekords (sic!). So hat ein Flugzeug, das am Morgen London verlassen, in zwei Stunden und 30 Minuten Paris erreicht. Hier wurde die Maschine kontrolliert, mit Petroleum, Öl und Wasser versehen und konnte bereits 50 Minuten später ihren Rückflug antreten. Sie nahm zwei Passagiere mit. Das Flugzeug war bereits um 2 Uhr, nach einem Flug, der zwei Stunden und 5 Minuten gedauert hatte, wieder an Ort und Stelle.« *Technische Monatshefte 4, S. 92*

## SO FUNKTIONIERT DIE ELEKTRISCHE ZAHNBÜRSTE

»Kniffe und Pfeife: Über dem Waschtisch hängt an einem Kabel ein kleiner Elektromotor, der eine biegsame Welle antreibt, an deren Ende sich die rotierende Zahnbürste befindet. Durch einen Druck mit dem Daumen auf die Verbindungsstelle der beiden Teile kann die Geschwindigkeit der Zahnbürste reguliert werden.« *Technische Monatshefte 4, S. 96*



Man putzt elektrisch.

## PHILOSOPHEN LEBEN LÄNGER

»Ueber den Einfluß der Berufstätigkeit auf die Lebensdauer berichtet Prof. Winkler. Darnach sind am langlebigsten die Landwirte, die Geistesarbeiter, vor allem die Philosophen, Mathematiker, Diplomaten, Redner und Künstler. Bei einseitig körperlicher Arbeit tritt frühzeitiges Alter ein, weil das Gehirn unausgebildet bleibt und früher senil wird. Die Studierten mit kürzerer Lebensdauer sind die Aerzte: gestörte Nachtruhe, schrankenlose Arbeitszeit, hohe Verantwortlichkeit sind die Ursache. Unter den Gewerben ist das Tischlerhandwerk das gesündeste. In der Mitte stehen die Bäcker, Metzger, Maurer, Schneider und Schuhmacher. Schlechter stehen: Steinhauer, Bergleute, Feilenhauer, Färber, Maler und am schlechtesten die Bierbrauer, Fuhrleute, Wirts- und Gasthausbediensteten, weil sie den Gefahren des Alkohols am meisten ausgesetzt sind.« *Die Umschau 15, S. 236*

## WIRD ES BALD SONNENKRAFTWERKE GEBEN?

# 1972

»Die Astronomen A. B. Mainel und M. Mainel schlagen folgenden Weg für eine wirtschaftliche Ausnutzung [der Sonnenenergie] vor: In den Wüsten der Vereinigten Staaten erreicht die Sonneneinstrahlung während 8 Stunden pro Tag Werte von etwa 1 kW pro m<sup>2</sup>. Wenn man den Boden mit Filtern bedecken würde, die nur im Infraroten reflektieren, ist es möglich, Sonnenenergie einzufangen. Unter den Filtern angebrachte thermische Sammelflächen können bis 500 °C aufgeheizt werden. Die Wärmeenergie wird in einen Behälter mit einer Mischung geschmolzener Salze gepumpt. Hierdurch dürfte sich eine Energiespeicherung erzielen lassen. Diese Konzeption verdient, weiter bearbeitet zu werden, allein aus Gründen des Umweltschutzes.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 4, S. 157*

## DIE SAHARA DEHNT SICH AUS

»In den letzten 7000 Jahren ist die Sahara als Folge klimatischer Veränderungen trockener geworden und dehnt sich aus. Dieser Effekt wird aber durch menschliche Aktivitäten überlagert. Der steigende Anbau von Dattelpalmen und Gemüse führt zu einer Absenkung des Spiegels des unterirdischen Wassers um einige Zentimeter pro Jahr. Überweidung zerstört die ursprüngliche Vegetation und fördert die Bodenerosion. Es ist noch nicht zu spät, die eingetretenen Schäden rückgängig zu machen. Dazu ist es notwendig, den Wasserverbrauch sorgfältig zu planen. Die natürliche Vegetation muß wieder hergestellt werden.« *Die Umschau 7, S. 205*

## SCHÜTZENDER SCHAUM FÜR PFLANZEN

»Eine Schaumdecke, die für Pflanzen nicht giftig ist und im Boden abgebaut wird, wurde entwickelt vom USDA's Agricultural Research Service. Sie hat den Zweck, junge Gemüsepflänzchen vor späten Frösten im Frühjahr zu schützen. Damit läßt sich die Saison für frisches Gemüse verlängern. Der Schaum hält für 8 bis 16 Stunden. Pflanzen bleiben viel wärmer als ungeschützte Pflanzen.« *Die Umschau 8, S. 238*



Forscher prüfen die Schaumdecke auf einem Acker.

## Selbstdiagnose-Terror

### Innere Verschwörung mit Folgen.

Eine Kurzgeschichte von Christian Endres

Ich trage eine Bombe in mir.

Mit Sicherheit kann ich es natürlich nicht sagen, dafür sind die einfach zu gut – man sucht vergeblich nach einer Narbe und verspürt außer Kopfschmerzen keinerlei Nachwirkungen von der Operation. Jemand weniger Sensibles als ich kriegt vermutlich gar nichts mit, bis es zu spät ist, und dann dürfte die Überraschung groß sein, aber nur sehr kurz währen.

Es wird als Verschwörung abgetan, doch es ist die Wahrheit, wie man überall im Netz nachlesen kann: Terrorgruppen nutzen arglose Menschen als Vehikel für Bombenattentate, die sie hinterher Selbstmordanschläge nennen. Sie entführen ihr Opfer, betäuben es, verfrachten es in einen mobilen OP in irgendeinem Keller und setzen ihm eine Bombe ein, die sie kurz darauf mitten im Alltag der nichts ahnenden Person hochgehen lassen.

Mir dreht sich der Magen um, wenn ich daran denke, dass die Bombe, die in mir steckt, jederzeit explodieren könnte.

Beruhige dich. Keine Panik jetzt. Denk nach!  
Wie sicher bin ich mir?

Schwer zu sagen, denn dummerweise ist mir vom gestrigen Abend bloß noch in Erinnerung, dass ich weit nach Mitternacht mit einem selbstfahrenden Taxi von einem Klub zum anderen wollte. Ist mein Filmriss ab da ein Anzeichen für einen Megakater, oder hat er mit der Betäubung vor der OP zu tun?

Am liebsten ginge ich sofort ins Krankenhaus, doch wie bei den meisten Leuten, die ich kenne, reicht mein Einkommen trotz Uniabschluss nicht dafür aus, dass sich die Sicherheitstüren der Notaufnahme einer Klinik für mich öffnen.

Meine Verzweiflung treibt mich zu extremen Maßnahmen.

Ich zittere so sehr, dass ich fast mein Smartphone fallen lasse bei dem Versuch, es altmodisch per Fingerabdruck zu entsperren.

»Steve anrufen«, sage ich gehetzt.

Es klingelt viermal, dann meldet sich die distinguierte Stimme meines Bruders, der als Anwalt im Monat mehr verdient als ich im Jahr. »Lange nicht gehört«, sagt er an Stelle einer Begrüßung.

Keine Zeit, mich zu rechtfertigen oder unser schiefes Verhältnis zu begradigen. »Hör zu!«, schnappe ich hysterisch. »Ich muss ins Krankenhaus! Es geht um Leben und Tod!«

Amüsiertes Schnauben in dieser fremden anderen Welt, in der ein Krankenhausbesuch so normal ist wie das Filet

vom fast ausgestorbenen Tunfisch und Biorotwein. »Geht es bei dir doch jedes Mal, Bruderherz. Du bist ein Hypochonder. Warst du schon immer. Aber bisher hat noch keine deiner versponnenen Internet-Selbstdiagnosen gestimmt.«

Er sagt das nicht voller Boshaftigkeit, nicht einmal voller Verachtung – aber voller Endgültigkeit, was noch schlimmer ist.

»Bitte«, bettle ich. »Du musst ...«

»Ich *muss* jetzt ins Meeting. Halt die Ohren steif. Gute Besserung, was auch immer es diesmal sein mag.«

Die Verbindung wird unterbrochen, und als ich mit bebender Stimme die Wahlwiederholung verlange, geht die Mailbox ran.

»Scheiße!«, brülle ich, verdrücke ein paar heiße Tränen und überlege fieberhaft, was ich tun soll.

Inzwischen bin ich mir absolut sicher, was die Bombe angeht.

Ich kann sie förmlich in mir spüren.

Mir bleibt im Grunde nur noch eines.

Ich muss in eine medKabine.

Mit der Reform und Privatisierung des Gesundheitssystems haben diese dreimal so großen Nachfahren der alten Telefonzellen Einzug in die Städte gehalten: weiße Plastikcontainer mit einem roten Kreuz an der Tür. Die fensterlosen Kisten dienen als kleiner, wenngleich voll ausgestatteter Untersuchungs- und Behandlungsraum. Selbst Darmspiegelungen und einfache Operationen können hier durchgeführt werden. Allerdings wird man nicht von Menschen untersucht und versorgt, sondern von einer medizinisch-interaktiven KI und deren technischen Extremitäten. Darum kostet die Behandlung deutlich weniger und ist aus finanzieller Sicht genau richtig für jene, die wegen ihrer Bonität in keine Klinik gelassen werden. Die Rechnung für die Verarztung in der medKabine wird – gegebenenfalls in Raten – automatisch vom nächsten Einkommen abgezogen; außerdem muss man seine Daten komplett den Betreibern überlassen, die sie für ihre eigene Forschung nutzen oder an andere Unternehmen verkaufen.

Ich poltere fünf Stockwerke die Treppe hinab und stürze durch die Eingangstür des Mietshauses. Unterwegs frage ich mich, was passieren würde, sollten die Terroristen die Bombe per Fernzünder genau in diesem Moment hochjagen. Würde das Haus einstürzen, zusätzlich eine Gasleitung explodieren? Wie viele Menschen würden beim Frühstück oder beim Duschen sterben?

So früh am Morgen ist draußen auf der Straße kaum etwas los. Ich hoffe, dass die Terroristen deshalb verzichten, den Zünder zu aktivieren, weil so wenige Opfer ihrer Sache nicht dienlich wären. Vielleicht beobachten sie mich ja gerade auch noch gar nicht; bestimmt kennen sie meinen Tagesablauf und wissen, dass ich normalerweise erst in einer Dreiviertelstunde in der U-Bahn sein werde.

Keuchend erreiche ich die medKabine vier Straßenkreuzungen weiter, ohne in die Luft gesprengt zu werden. Eilig öffne ich die Tür, die sich mit einem leisen Zischen hinter mir verschließt, und akzeptiere die Vereinbarung zur Nutzung meiner Daten.

Zum Glück habe ich keine Platzangst. Das beengte Innere der Kabine, die nach jedem Patienten sterilisiert wird, riecht scharf und chemisch. Sie hat etwas von einem Raumschiff: weißes Plastik ohne Ecken und Kanten, eine höhenverstellbare gepolsterte Liege, viele Kameras, Sensoren, Displays und nicht von außen zu öffnende Panzerglasschranke; von der Decke ragen mehrere gelenkreiche Greifarme mit diversen Aufsatzmodulen.

»Guten Tag. Wie kann ich Ihnen helfen?«, ertönt die körperlose Stimme der medKabinen-KI, die längst meine Werte gescannt hat und daher mit männlichen Preferences auf mich reagiert, während sie die Daten meiner Krankengeschichte herunterlädt und analysiert. »Ihr Puls ist zu hoch. Sie sind gestresst. Tut Ihnen etwas weh?«

»Man hat mir eine Bombe eingepflanzt!«, sprudelt es aus mir heraus. »Terroristen! Gestern Nacht! Das Ding muss entfernt werden, bevor die es hochgehen lassen! Bitte! Schnell!«

»Die Scans zeigen keinen Fremdkörper in Ihnen an«, informiert mich die KI sachlich und fügt ein wenig vorwurfsvoller hinzu: »Sie haben nicht einmal gefrühstückt.«

»Ich habe eine Bombe in mir«, stelle ich voller Überzeugung klar. »Wahrscheinlich ist die Biotechnik der Terroristen so gut, dass deine Scanner sie nicht erfassen können.«

»Das wäre theoretisch möglich«, räumt die KI ein, »jedoch sehr unwahrscheinlich.«

»Hol das Ding aus mir raus!« Ich springe auf, fasse nach einem der über mir schwebenden Greifarme und zerre ihn wild in Richtung meines Bauchs.

Er wird mir mit einem surrenden Ruck entzogen.

»Ohne entsprechende Diagnose kann ich keine solche Operation durchführen«, sagt die KI dennoch ruhig.

»Ich weiß, dass ich eine Bombe in mir habe! Ich kann es spüren. Ich werde sterben! Du bist dazu verpflichtet, mir zu helfen!«

»Das stimmt«, erwidert die KI. »Jedoch nur, wenn Ihr Leben definitiv in Gefahr ist und ich Ihnen keinen größeren Schaden zufüge.«

»Aber ich bin in Lebensgefahr!« Ich dreh gleich durch, doch mir kommt ein genialer Einfall: »Mach einen Lügendetektortest! Dann weißt du, dass ich die Wahrheit sage.«

Obwohl nur Parameter laufen und Präzedenzfälle abgeglichen werden, habe ich das Gefühl, dass die KI zögert. »Also schön«, antwortet sie, schließt ein paar Sonden an und führt mit drei Dutzend Fragen den Test durch.

Ich bestehe ihn.

»Und nun?«, frage ich ungeduldig. »Operierst du mir jetzt endlich die verdammte Bombe raus? Eigentlich müsste ich gleich in der U-Bahn sitzen. Wenn die Bombe zeitgesteuert ist, bleibt uns nicht mehr lange, bevor sie explodiert.«

»Keine Operation«, versetzt die Kabinen-KI, die Macht über mein Schicksal, Leben und Sterben hat. »Kommen Menschen mit einem nachgewiesenen explosiven Gegenstand hierher, muss ich laut Protokoll die Polizei alarmieren. Was ich bereits bei Bestehen des Lügendetektortests gemacht habe. Die nächste mobile Antiterrorereinheit sollte gleich hier sein.«

Wie aufs Stichwort höre ich, dass draußen ein schweres Fahrzeug anrauscht und scharf abbremst. Eine Schiebetür wird geöffnet, Stiefel stampfen über den Asphalt.

Es knirscht im Lautsprechersystem des automatisierten Behandlungsraums. Daraufhin donnert eine militärisch klingende, befehlsgewohnte Frauenstimme: »Die Kabine ist umstellt! Wir haben Sie mit unserer Infrarotzielerfassung im Visier und betrachten Sie als potenzielle Gefahr für die öffentliche Sicherheit. Sollte sich dieser Verdacht erhärten, werden wir innerhalb unserer Befugnisse alles tun, diese Gefahr zu eliminieren.« Sie pausiert kurz. »Unsere Bioscanner zeigen nichts an, doch laut medKabine haben Sie eine Bombe in Ihrem Körper. Erklären Sie sich!«

»Genau!«, rufe ich vor Panik und Angst völlig außer mir. Ich springe von der Liege. »Die Bombe wird jeden Moment hochgehen!«

Keine Reaktion.

Verzweiflung und Zorn wirbeln durch meinen Verstand. Mir fällt nur noch ein Ausweg ein.

»Ich werde jetzt meinen Bruder anrufen«, verkünde ich der medKabine und allen, die es sonst hören. Ich schiebe eine Hand in die Westentasche und hole mein Smartphone hervor. Hoffentlich ist Steves Meeting vorbei, und er geht ran – und sei es nur, um mich zusammenzustachen, da ich ihn schon wieder belästige. »Er ist ein erfolgreicher Anwalt und wird euch alle verklagen, wenn ich nicht sofort ...«

»Er hat ein Smartphone!«, schneidet mir die Stimme der Einsatzleiterin das Wort ab. »Er will sie zünden! Feuer frei! Feuer frei!«

Gewehre rattern.

Projektile durchsieben die medKabine.

Es fühlt sich an, als explodierten in mir lauter Bomben. ◀

#### DER AUTOR

**Christian Endres** lebt in der Nähe von Würzburg und schreibt regelmäßig für den »Tagesspiegel«, »tipBerlin«, »Geek!« und andere. Als Redakteur wirkt er am Sciencefiction-Portal »die zukunfft« mit, außerdem betreut er die deutschsprachigen Comics mit Spider-Man, Batman und den Avengers. Für seine Arbeit wurde er mit dem Deutschen Phantastik Preis und dem Kurd-Laßwitz-Preis ausgezeichnet.

# VORSCHAU



EVERETT / VLAHEVNO / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## WORAUS DIE RAUMZEIT BESTEHT

Unsere Realität könnte sich aus der Struktur und dem Verhalten noch grundlegenderer Komponenten als den bekannten Teilchen und Kräften ergeben. Solche theoretischen Ansätze sollen endlich Relativitäts- und Quantentheorie vereinen. Dabei konkurrieren derzeit mehrere Herangehensweisen. Zwar gelten einige unter ihnen als viel versprechend, aber ein Durchbruch steht noch aus.



RENE KRZYWIZYNSKI

## LEBEN IM TOD

In europäischen Wäldern stößt man selten auf ein verendetes Tier – Kadaver werden aus Hygienegründen meist schnell beseitigt. Dabei bietet Aas eine wichtige Nahrungsquelle für Insekten, Vögel oder Säuger. Deshalb plädieren Kadaverökologen hier für mehr Toleranz.



AGSANDREW / GETTY IMAGES / ISTOCK

## ZEIT FÜR EINE NEUE ORDNUNG?

Das Periodensystem steht seit über 100 Jahren für eine verlässliche Ordnung der chemischen Elemente. Doch angesichts neuer Entdeckungen muss man sich fragen: Gibt es vielleicht etwas Besseres?



ACHIM HALLEY (COMMONS:WIKIMEDIA.ORG/MIKULASZFRIMORPHA); SHARPERIGGS (COMMONS:WIKIMEDIA.ORG/MIKULASZFRIMORPHA); ICHTHT/COMMONS.ORG/LOUISIANA/SHARPERIGGS

## PHOTONIK NACH DEM VORBILD NATUR

Die farbenfrohen Muster vieler Insekten beruhen auf winzigen Nanostrukturen in den Panzern oder Flügeln der Tiere. Sie inspirieren die Wissenschaft zur Entwicklung völlig neuartiger photonischer Bauteile.

## 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](http://spektrum.de/newsletter)



# DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



**Spektrum**  
der Wissenschaft  
**DIE WOCHE**

NR **07**  
17.02.  
2022

- > Peptide können auch im Weltall entstehen
- > Ursprung eines mysteriösen Tsunamis geklärt
- > Hustender Dino: Atemwegsinfektion vor 150 Millionen Jahren

TITELTHEMA: KRYPTOGRAPHIE

## Schutz vor Quantenhackern

In Zukunft könnten Quantencomputer herkömmliche Verschlüsselungen knacken. Deshalb liefern sich Programmierer weltweit einen Wettlauf gegen die Zeit, um unsere Daten auch künftig zu schützen.

**BARTHOLOMEW ROBERTS**  
Der erfolgreichste Pirat aller Zeiten

**ENDOMETRIOSE**  
Jeden Monat eine Geburt

**GAIN-OF-FUNCTION-FORSCHUNG**  
»Fehler bedeuten nicht gleich, dass ein Virus freigesetzt wird«

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)

