ARCHÄOGENETIK

Die Überlebenden der Kälte

Inzwischen liegt die DNA von mehreren hundert *Homo sapiens* aus der Altsteinzeit vor. Die Daten decken auf, was bislang unbekannt war: wie die Menschen auf den europäischen Kontinent strömten und wie die Eiszeit sie zerstreute oder auslöschte.

Vor 25 000 Jahren näherte sich die Eiszeit ihrem letzten großen Höhepunkt. Von Norden her schoben sich Eismassen aus Skandinavien heran. Von Süden drangen die Alpengletscher nordwärts. Wo heute Berlin liegt, reichte ein 100 Meter dicker Eisschild in den Himmel. Zwischen den Eisfronten: eine unwirtliche, kalte Steppe. Spuren von Menschen, die hier einst Jagd machten auf Mammut, Pferd oder Rentier und Figuren schnitzten, sucht man vergeblich. Sie waren verschwunden. Aber wohin? Und wer machte Mitteleuropa wieder zu seiner Heimat, als 6000 Jahre später das frische Grün zurückzukehren begann?

Antworten gibt eine Gruppe um Cosimo Posth von der Universität Tübingen. Die Forscherinnen und Forscher haben das Erbgut von mehreren hundert Menschen analysiert, deren Knochen bei archäologischen Ausgrabungen entdeckt wurden. Die ältesten sind 35 000 Jahre alt, die jüngsten nur 5000; die westlichsten Funde stammen von der Iberischen Halbinsel, die östlichsten aus dem heutigen Tadschikistan. Das ermöglichte es dem Team, die genetische Landschaft der europäischen Eiszeit in Raum und Zeit zu durchstreifen.

Die vielköpfige Arbeitsgruppe, an der neben Posth auch He Yu von der Universität Peking und Johannes Krause vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie (EVA) in Leipzig beteiligt waren, bestimmte das Erbgut von 116 Menschen der Altsteinzeit neu und fügte die Daten den bereits bekannten Sequenzen von 230 weiteren Individuen hinzu. In Europa begann die Geschichte der modernen Menschen allerdings nicht erst vor 35 000 Jahren, sondern bereits viel früher. Ihre ältesten, ungefähr 45 000 Jahre alten Spuren hat ein Team um Jean-Jacques Hublin vom EVA im heutigen Bulgarien gefunden. Ebenso war *Homo sapiens* in Rumänien, Tschechien und anderen Ländern schon vor mehr als 40 000 Jahren zu Hause.

Als Posth und seine Kollegen ihre DNA-Sequenzen mit denen jener ältesten Europäer verglichen, machten sie eine verblüffende Feststellung: Das Erbgut dieser ersten modernen Menschen in Europa ist nahezu spurlos verschwunden. »Dauerhaft erfolgreich war diese erste Einwande-

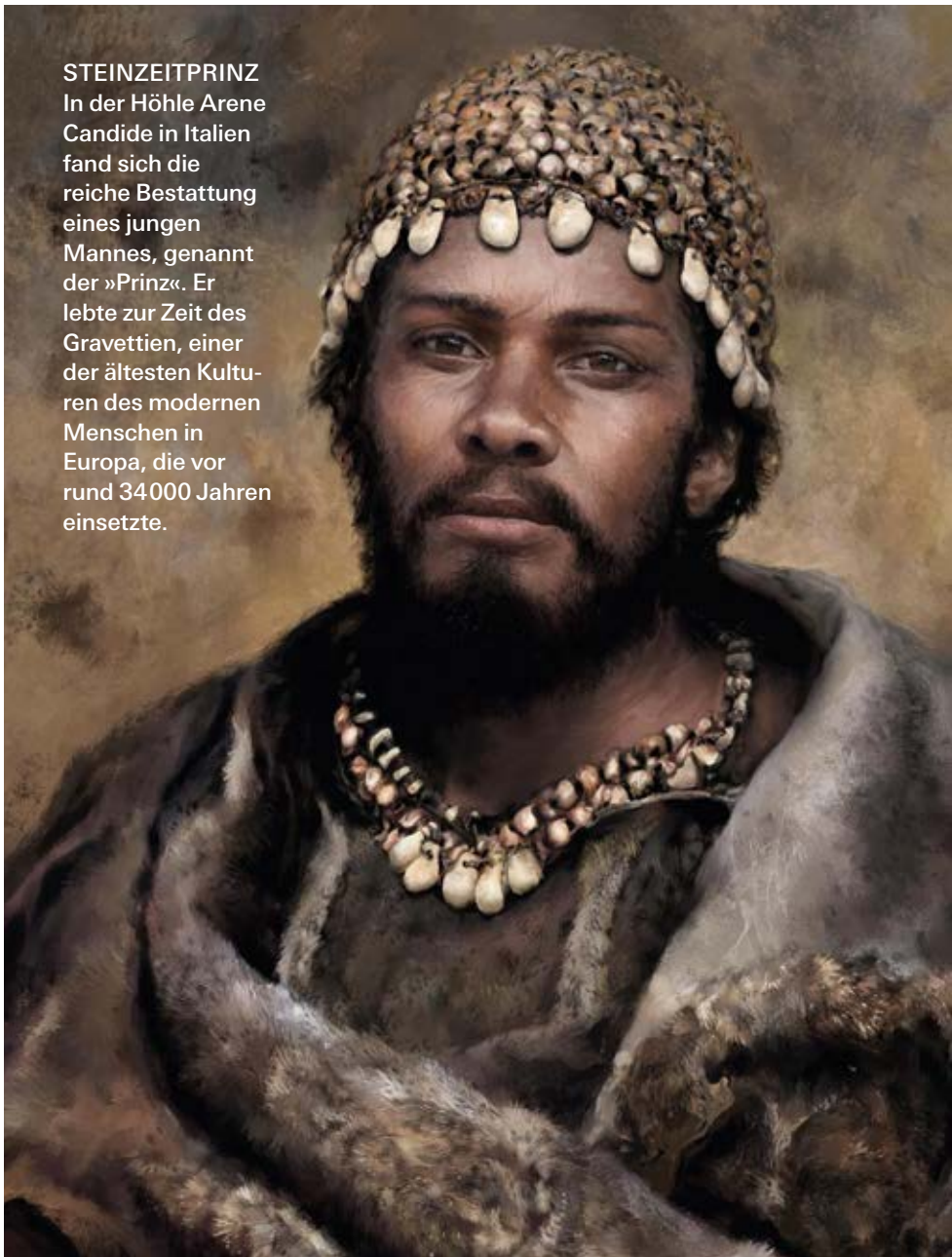


ILLUSTRATION: TOM BJÖRKLUND

STEINZEITPRINZ
In der Höhle Arene Candide in Italien fand sich die reiche Bestattung eines jungen Mannes, genannt der »Prinz«. Er lebte zur Zeit des Gravettien, einer der ältesten Kulturen des modernen Menschen in Europa, die vor rund 34 000 Jahren einsetzte.

rung von *Homo sapiens* also nicht«, erklärt Olaf Jöris, Steinzeitexperte vom Forschungszentrum MONREPOS in Neuwied, der an den Arbeiten Posths nicht beteiligt war.

Doch bei ihrem zweiten Anlauf bissen sich die modernen Menschen fest. Die Nachfolger der Pioniere sind der Forschung durch ihre Steinwerkzeuge gut bekannt. Ihre Hinterlassenschaften ähneln sich stark, ob sie nun auf der Iberischen Halbinsel oder in der heutigen Ukraine gefunden wurden. Das Gravettien, wie es in der Fachsprache heißt, glich einer frühen Europäischen Union: In der Zeit von vor 32000 bis vor 24000 Jahren fertigten die Menschen ihre Steinwerkzeuge in diesem riesigen Gebiet mit einer ähnlichen Technik und freuten sich an der gleichen Kleinkunst mit Schnitzereien und Gravierungen von Tiergesichtern auf Geweihen oder Knochen. Sie fanden in Europa vor dem Höhepunkt der Eiszeit ein gutes Auskommen.

Rückzug vor dem Eis

Aber waren sie auch untereinander verwandt? Gehörten sie zu ein und derselben genetischen Gruppe? Dank einer wahren Detektivarbeit habe das Team um Posth »überraschende Antworten auf diese Fragen« bekommen, sagt Jens Blöcher, der an der Universität Mainz das Erbgut von Menschen aus der Bronze- und Steinzeit untersucht und an der Studie ebenfalls nicht mitwirkte.

Zunächst stellten die Forscher fest, dass die Angehörigen des Gravettien sich wie vermutet aus Mitteleuropa zurückzogen, als sich das Eis heranschob. Aber sie waren nie ganz verschwunden: Spuren ihres Erbguts finden sich noch bei heute lebenden Menschen. Folglich zählen sie zu den Urahnen vieler Europäer.

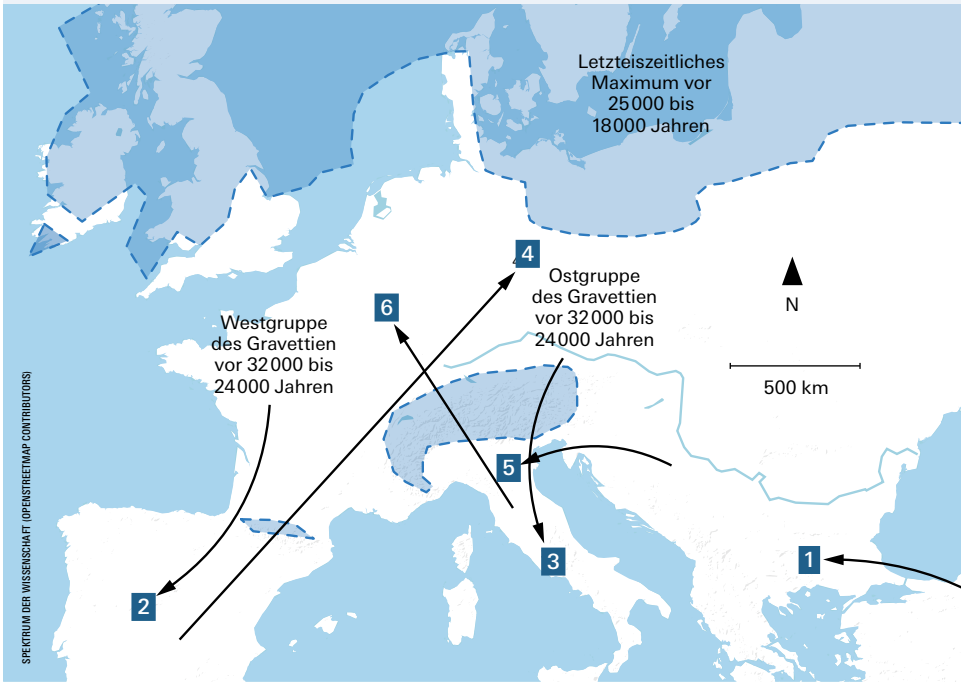
Unerwarteter aber war die zweite Erkenntnis zur vermeintlichen Europäischen Union der Altsteinzeit. Ihre Angehörigen im Westen des Kontinents stammen anscheinend von einer älteren, noch nicht näher identifizierten Gruppe ab. Sie sind genetisch klar unterscheidbar von ihren Kulturgenossen im Osten, die im heutigen Tschechien bis hinunter auf den italienischen Stiefel lebten und deren Ahnen wohl aus noch weiter östlichen Regionen im heutigen Russland stammten. Diese genetische Zweispaltung der Gravettien-Gruppen manifestierte sich auch in der sonst überregional einheitlichen Kultur. »Wir können zeigen, dass es im östlichen Mitteleuropa und in Südeuropa andere Bestattungsriten als in West- und Südwesteuropa gab«, erklärt Posth. Wo sich die Populationen aus Ost und West berührten, kam es allerdings immer wieder zur Vermischung der beiden genetischen Gruppen.

Bald aber sorgten die vorrückenden Gletscher und das kälter werdende Klima für Umwälzungen. Vermut-

Wege der Jäger und Sammler

Die Analyse menschlichen Erbguts aus der Steinzeit ergab, dass die Geschichte der europäischen Jäger und Sammler sehr viel bewegter war als bislang angenommen.

1. **Vor 45000 Jahren:** *Homo sapiens* erreichte erstmals Europa.
2. **Vor 22000 bis 18000 Jahren:** Gruppen des Solutréen lebten während der Eiszeit im Südwesten des Kontinents.
3. **Vor 22000 bis 18000 Jahren:** Angehörige der Ostgruppe, die auch nach Süden gezogen waren, überdauerten die Eiszeit nicht.
4. **Vor 18000 bis 15000 Jahren:** Gruppen des Magdalénien besiedelten Europa.
5. **Vor 17000 Jahren:** Gruppen des Epigravettien kamen aus Anatolien über den Balkan auf die italienische Halbinsel.
6. **Vor 14000 Jahren:** Menschen zogen von Italien nach Mitteleuropa und verdrängten die dort ansässigen Jäger und Sammler.



lich war die Kälte nicht einmal das größte Problem für die Steinzeitmenschen: So schnitten die Eismassen Flüssen wie der Oder und der Weichsel den Weg nach Norden zu ihren alten Mündungen ab. Das Wasser bahnte sich daher seinen Weg nach Westen und floss schließlich in den Nordatlantik. Die Landschaft veränderte sich nicht nur dadurch gravierend, sondern auch, weil es den allermeisten Bäumen zu kalt und zu trocken wurde. Lediglich in gut geschützten Lagen konnten sich wohl kleine Baumgruppen halten.

»In dieser Zeit verdunstete aus dem sehr kalten Nordatlantik nur noch sehr wenig Wasser, und die Niederschläge in Mitteleuropa gingen drastisch zurück«, schildert Olaf Jöris die vielleicht wichtigste Veränderung in den Regionen zwischen den Eismassen, verwandelte dieser Wassermangel doch die gesamte Natur. Bäume verschwanden, Tiere zogen sich in mildere und vor allem feuchtere Regionen zurück – und die Steinzeitmenschen folgten ihnen. Solche Rückzugsregionen vermutet die Forschung schon lange im heutigen Südfrankreich und auf der Iberischen Halbinsel sowie auf dem italienischen Stiefel und auf dem Balkan.

Als das Eis schwand

Dank der neuen DNA-Daten konnten die Fachleute gemeinsam mit einem Team um die Leipziger Forscherin Vanessa Villalba-Mouco erstmals in diese Rückzugsorte der westlichen Angehörigen des Gravettien vorstoßen. Auf ihrem Weg nach Süden entwickelten die Menschen eine neue Kultur: das Solutréen. Es ist bekannt für sehr fein gearbeitete Lanzen- und Speerspitzen. Solche Funde stammen aus der Zeit von vor 22000 bis vor 18000 Jahren und fanden sich entlang der Atlantikküste des heutigen Südfrankreich bis hinunter nach Portugal sowie an der Mittelmeerküste des heutigen Spanien.

Als sich danach die Gletscher langsam zurückzogen, die Temperaturen stiegen und die Niederschläge wieder häufiger wurden, kehrten die Menschen in die entvölkerten Regionen im Norden zurück: »Die Nachkommen der westlichen Gruppe tauchen sogar im heutigen Polen wieder auf«, sagt Cosimo Posth. Archäologen kennen die Kultur, die sie ausprägten, als Magdalénien.

Etwas völlig anderes passierte im östlichen Mitteleuropa und in Südeuropa. Den Höhepunkt der letzten Eiszeit überdauerten diese Gruppen offenbar nicht – ihr Erbgut lässt sich danach nicht mehr nachweisen. Doch ungefähr gleichzeitig tauchte im Nordosten des heutigen Italien eine neue Gruppe auf. »Die genetischen Strukturen dieser Neuankömmlinge deuten auf einen Ursprung im Nahen Osten hin«, erklärt Posth. Möglicherweise kamen jene Menschen damals vom Balkan; DNA von dort haben die Forscher allerdings nicht untersucht. Den Archäologen sind sie als Angehörige des späten Gravettien oder Epigravettien bekannt, auch wenn sie mit ihren Vorgängern vor dem eiszeitlichen Maximum genetisch gesehen wenig verbindet.

Die neu Angekommenen breiteten sich mit der Zeit bis zur Spitze der italienischen Halbinsel aus. Je weiter sie kamen, umso kleiner wurde die Bevölkerungsgruppe. Als sie schließlich Sizilien erreichten, steckten sie nicht nur geografisch in einer Sackgasse: »Dort ähnelte sich das Erbgut der Menschen damals sehr«, erklärt Posth. Das deutet auf einen genetischen Flaschenhals hin. »Die effektive Populationsgröße lag in dieser Zeit nach den Erbgutanalysen auf Sizilien wohl nur noch bei 70 Personen«, fasst Paläogenetiker Blöcher zusammen. Mit dieser Kennzahl werden allerdings nur jene Menschen erfasst, die zu einem gegebenen Zeitpunkt ihre DNA tatsächlich weitergegeben haben. Die wahre Bevölkerungsgröße auf Sizilien war sicher deutlich höher. In solchen Flaschenhalssituationen genügt dann oft eine kleine Störung – eine Hungersnot, ein Vulkanausbruch – und von der Population ist nichts mehr übrig. Vielleicht erledigte ein ähnliches Schicksal die östlichen Angehörigen des Gravettien.

Doch die Bewohner des italienischen Stiefels starben nicht aus. Als sich das Klima vor ungefähr 14000 Jahren rasch erwärmte, Niederschläge wieder Mitteleuropa erreichten und Wälder nach Norden vordrangen, begannen sie mit ihrer Wanderung zurück in diese Region. Nach und nach ersetzten sie die Gruppen, die bereits mit etwas Vorsprung aus Südwesteuropa dorthin gezogen waren. Diese Entwicklung deckt sich mit den archäologischen Daten: »Vor 14000 Jahren wurden vorher naturalistische durch abstrakte oder geometrische Darstellungen ersetzt«, erklärt Olaf Jöris.

Ankunft der Bauern

Bald aber zeichnete sich eine neue Teilung des Kontinents ab: 6000 Jahre lang tauschten die Jäger-und-Sammler-Gruppen in Osteuropa kaum Erbgut mit den Jägern und Sammlern im Westen und im Zentrum des Kontinents aus. Auch anatomisch unterschieden sich diese Gruppen in Haut- und Augenfarben deutlich. Doch dann begannen sich vor ungefähr 8000 Jahren die ersten Bauern von Anatolien aus nach Europa auszubreiten.

Sie drängten die ursprünglichen Gruppen vermutlich nach Norden und Nordosten zurück und brachten sie so in engeren Kontakt, wodurch sich ihre Genpools wieder aneinander annäherten. Danach endet zwar die Studie des Teams um Cosimo Posth, die dynamischen Veränderungen der Bevölkerung in Europa gingen allerdings weiter. ◂

Roland Knauer ist Wissenschaftsjournalist in Lehnin.

QUELLEN

Hublin, J.-J. et al.: Initial upper palaeolithic *Homo sapiens* from Bacho Kiro Cave, Bulgaria. Nature 581, 2020

Posth, C. et al.: Palaeogenomics of Upper Palaeolithic to Neolithic European hunter-gatherers. Nature 615, 2023

Villalba-Mouco, V. et al.: A 23,000-year-old southern Iberian individual links human groups that lived in Western Europe before and after the Last Glacial Maximum. Nature Ecology & Evolution 2023

ATMOSPHÄRENCHEMIE

Wie Waldbrände den Ozonabbau beschleunigen

Nach starken Bränden wird in der Stratosphäre verstärkt Ozon abgebaut. Eine Forschungsgruppe hat nun herausgefunden, welche Prozesse dazu führen.

Bei den verheerenden australischen Buschbränden, die zwischen 2019 und 2020 wüteten, stiegen gigantische Rauchschwaden in die Luft. Sie wurden um den ganzen Globus getragen und beeinflussten sogar die Luftqualität im weit entfernten Südamerika. Wie Satellitendaten gezeigt haben, hat der Rauch jener Brände auch die Zusammensetzung der oberen Atmosphäre verändert und dazu geführt, dass die Menge an stratosphärischem Ozon sank. Die Ozonschicht schützt das Leben auf der Erde vor schädlicher kurzwelliger ultravioletter Strahlung.

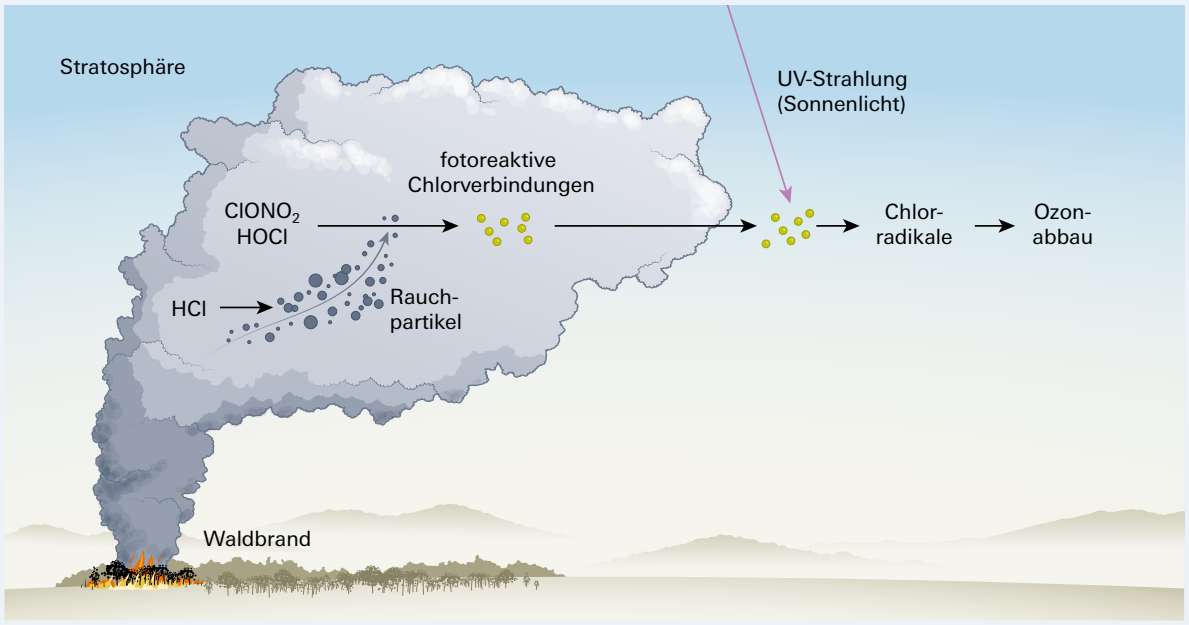
Warum der Rauch von Waldbränden den Ozonabbau verstärken kann, war bislang unklar. Nun hat ein Team um die Atmosphärenwissenschaftlerin Susan Solomon am Massachusetts Institute of Technology in den USA herausgefunden, was Feinstaub aus dem Rauch dabei bewirkt.

1974 wiesen Modellrechnungen erstmals darauf hin, dass die damals zunehmende Menge an Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW, häufig verwendet in Spraydosen, Schaumstoffen und Kühlgeräten) in der Stratosphäre Chlorradikale freisetzen kann, die Ozon katalytisch zerstören könnten. Mitte der 1980er Jahre folgte dann eine dramatische Entdeckung: Jedes Jahr dünnt im antarktischen Sommer die Ozondecke über der Südpolarregion aus, das Ozonloch bildet sich. Die Ergebnisse hatten weit reichende Folgen. 1987 verbot das Montrealer Protokoll Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen; die weltweite Nut-



Waldbrände fördern Ozonabbau

Bei starken Waldbränden gelangen Rauchpartikel oft bis in die Stratosphäre. Eine Forschungsgruppe um Susan Solomon und Kane Stone hat nun herausgefunden, dass sie dort Chlorwasserstoffgas (HCl) absorbieren können, das vor allem aus dem Abbau von FCKW stammt (im Bild nicht gezeigt). Dadurch sind die Partikel in der Lage, einen weiteren Prozess zu katalysieren: die Umwandlung anderer chlorhaltiger Gase wie Chlornitrat ($ClONO_2$) und hypochloriger Säure (HOCl) in »fotoreaktive« Chlorverbindungen. Trifft auf diese Moleküle ultraviolettes Licht aus der Sonnenstrahlung, setzen sie Chlorradikale frei, die Ozon katalytisch abbauen und so dessen Konzentration in der Stratosphäre verringern.



NATURE: MONELL, V.F., THORNTON, J.A.: HOW WILDFIRES DEPLETE OZONE IN THE STRATOSPHERE. NATURE 615, 2023, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

zung von FCKW wurde schrittweise verringert und schließlich gestoppt. Dadurch erholte sich die stratosphärische Ozonschicht allmählich. Da FCKW sehr lange in der Erdatmosphäre verweilen, ist dieser Prozess immer noch nicht abgeschlossen.

Als das Ozonloch zum ersten Mal beobachtet wurde, bestand die Herausforderung für Atmosphärenchemiker darin, seine einzigartigen saisonalen und räumlichen Merkmale zu erklären. Zwar war anhand der Beobachtungen eindeutig, dass das Ozonloch mit Chlor zusammenhing, das durch menschliche Aktivitäten in die Luft eingebracht worden war. Wann es auftrat und in welchem Ausmaß, ließ sich aber nicht chemisch erklären.

Einen wichtigen Durchbruch brachten Theorie- und Laborstudien, an denen Solomon damals bereits beteiligt war. Sie offenbarten Reaktionen auf der Oberfläche stratosphärischer Eispartikel, aus denen die schillernden »Perlmuttwolken« bestehen, die manchmal in den Polarregionen zu sehen sind. Während des dunklen Polarwinters katalysieren diese Oberflächen effizient Reaktionen von Chlorwasserstoff (der meist aus dem Abbau von FCKW stammt) mit anderen relativ trägen chlorhaltigen Gasen, darunter Chlornitrat ($ClONO_2$) und hypochloriger Säure (HOCl). Dadurch entstehen so genannte fotoreaktive Formen von Chlor. Sobald im polaren Frühling das Sonnenlicht zurückkehrt, verwandelt es diese Substanzen in eine Vielzahl hochreaktiver Chlorradikale, die Ozon abbauende Prozesse in Gang setzen. Und noch auf eine zusätzliche Weise tragen die Eispartikel zum Ozonabbau bei: Sie entziehen der Atmosphäre bestimmte Stickstoffoxide (N_2O_5 und HNO_3). Die dienen normalerweise als Reservoir für Stickstoffoxidradikale, welche wiederum die durch Chlor katalysierte Ozonzerstörung behindern.

Bei den niedrigen Temperaturen, wie sie in der Stratosphäre herrschen, können die Eispartikel Chlor besonders gut aktivieren und Stickoxide ausgesprochen effektiv beseitigen. Es gibt aber Hinweise darauf, dass auch andere Arten feinster Teilchen eine Rolle spielen könnten. So ge-

langten mit dem gewaltigen Ausbruch des Vulkans Pinatubo auf den Philippinen im Jahr 1991 große Mengen Schwefeldioxid in die Stratosphäre. Das Gas wurde über weite Strecken transportiert und oxidiert, so dass schließlich über großen Teilen der Erde eine Schicht aus reflektierenden Schwefelsäurepartikeln lag. Diese verringerten zum einen die globale Durchschnittstemperatur für mehr als ein Jahr um zirka ein halbes Grad Celsius. Zum anderen beschleunigten sie den Ozonabbau in der Stratosphäre, und zwar nicht nur in den Polarregionen, sondern ebenso in den mittleren Breiten.

Überraschender Fund

Die australischen Buschbrände fast 30 Jahre später setzten ebenfalls Rauchpartikel frei, allerdings mit einer ganz anderen chemischen Zusammensetzung. Durch die starke Hitze gelangten gasförmige und feste Rauchbestandteile bis in die Stratosphäre. Laut den neuen Ergebnissen des Teams um Solomon absorbieren die Feinstaubteilchen dort in größerem Umfang Chlorwasserstoffgas und verstärken dadurch die chemische Aktivierung der Ozon zerstörenden Chlorradikale (siehe »Waldbrände fördern Ozonabbau«).

Das war zunächst überraschend. Die Teilchen im Rauch von Waldbränden bestehen hauptsächlich aus Ruß und organischen Kohlenstoffverbindungen. Damit sind sie auf den ersten Blick ungeeignet, Chlor zu aktivieren oder Stickoxide zu binden. Denn unter trockenen Bedingungen, wie sie bei Bränden herrschen, sind solche Partikel im Allgemeinen weniger reaktiv als in Eis oder wässrigen Lösungen. Zudem vermutet man, dass sie bei den extremen Gegebenheiten in der unteren Stratosphäre eventuell glasartig auftreten – und in dieser Form sind sie nur schlecht zugänglich für reaktive Gase.

Möglicherweise liegen die Rauchpartikel in der Stratosphäre jedoch gar nicht in einem trockenen oder glasartigen Zustand vor. Den ersten Hinweis darauf erhielten die Fachleute, als sie Daten des Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer analysierten. Bei diesem Projekt wird die Atmosphäre mit einem Spektrometer überwacht, das auf einem Weltraumsatelliten stationiert ist. Die Daten legten nahe, dass die stratosphärischen Partikel aus den australischen Waldbränden sowohl sauerstoffhaltiges organisches Material als auch adsorbiertes Wasser enthalten.

Auf dieser Beobachtung baut die aktuelle Studie auf. Durch thermodynamische Betrachtungen leiten die Autoren und Autorinnen die These her, dass komplexe Mischungen sauerstoffhaltigen organischen Materials selbst bei niedrigen Stratosphärentemperaturen wahrscheinlich flüssigkeitsähnlich sind. Sie stützen sich unter anderem auf eine Reihe von Laborstudien zur Löslichkeit von Chlorwasserstoff in Mischungen aus organischen Säuren und Wasser.



PIRANKA / GETTY IMAGES / ISTOCK

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

JAHRGANG **2022**

CD-ROM

Die **Spektrum**-CD-ROM enthält den kompletten Inhalt (inklusive Bildern) des Jahrgangs 2022 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 2022 als PDF-Datei.

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

Tel. 06221 9126-743
service@spektrum.de
Spektrum.de/shop

Demnach können solche Mischungen Chlorwasserstoff sogar besser absorbieren als Schwefelsäure, der häufigere Bestandteil stratosphärischer Partikel. Mit anderen Worten: Rauchpartikel haben ein größeres Potenzial, den Ozonabbau zu fördern als bisher angenommen. Auf dieser Grundlage können die Atmosphärenforscher den während der australischen Waldbrände beobachteten Ozonabbau im Computermodell reproduzieren. Sie verwenden dazu numerische Modelle, die den von ihnen vorgeschlagenen Prozess mit der bekannten Chemie der Chloraktivierung und der durch Chlor katalysierten Ozonzerstörung kombinieren.

Durch die Studie wird klar, dass die Aktivierung von Chlor durch die Rauchpartikel das fehlende Puzzleteil ist, um den Zusammenhang zwischen Waldbränden und Ozonabbau zu verstehen. Außerdem müssen Vorschläge, das Klima durch so genanntes Geoengineering zu beeinflussen, im Licht der neuen Ergebnisse betrachtet werden – speziell der Vorschlag, absichtlich Partikel in die Stratosphäre einzubringen, um Sonnenlicht zu reflektieren und damit den Planeten zu kühlen. Solange man dabei andere Partikel als Schwefelsäure verwende, so wird teilweise unterstellt, ließen sich negative Nebenwirkungen wie Ozonabbau oder die Erwärmung der Stratosphäre umgehen oder zumindest minimieren. Die aktuelle Studie betont nun, dass verschiedene Partikeltypen – ob frisch oder nach chemischer Umwandlung in der Stratosphäre – den Ozonabbau noch jahrzehntelang verstärken könnten, während der Chlorgehalt dort schon langsam sinkt. Jedes Material, das man für eine Injektion in die Stratosphäre in Betracht zieht, muss daher zumindest im Labor unter simulierten stratosphärischen Bedingungen sorgfältig untersucht werden.

Die australische Waldbrandsaison 2019/2020 war zwar extrem, doch große Waldbrände und die daraus hervorgehenden Pyrocumulonimbuswolken werden durch den Klimawandel wahrscheinlich häufiger und intensiver werden. Der Rauch, der in der Folge in die obere Atmosphäre gelangt, könnte daher die derzeit ablaufende Erholung der stratosphärischen Ozonschicht verlangsamen oder vorübergehend stören. Es ist also wichtiger denn je zu verstehen, wie sich komplexe Partikel, die beim Verbrennen von Biomasse entstehen, in der Stratosphäre verhalten. ◂

V. Faye McNeill ist Professorin für Chemieingenieurwesen sowie Geo- und Umweltwissenschaften an der Columbia University im US-Bundesstaat New York. **Joel A. Thornton** ist Professor für Atmosphärenwissenschaften an der University of Washington in Seattle.

QUELLEN

Bernath, P. et al.: Wildfire smoke destroys stratospheric ozone. Science 375, 2022

Solomon, S. et al.: Chlorine activation and enhanced ozone depletion induced by wildfire aerosol. Nature 615, 2023

Solomon, S. et al: On the depletion of Antarctic ozone. Nature 321, 1986

nature
© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 615, S. 219–221, 2023

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Sind Sprachmodelle bald die besseren Mathematiker?

Algorithmen wie ChatGPT tun sich selbst mit einfachen Rechenaufgaben noch immer schwer. Zwei neue Ansätze sollen das ändern – und könnten KI deutlich intelligenter machen.

In den letzten Monaten hat das Sprachmodell ChatGPT weltweit für Schlagzeilen gesorgt. Der im November 2022 veröffentlichte Chatbot von OpenAI kann menschliche Sprache so überzeugend verarbeiten, dass er ähnlich kreativ und intelligent wie ein Mensch wirkt: Er gibt detaillierte Antworten auf schriftliche Fragen und kann Gedichte oder Lieder verfassen. Allerdings sind solche Programme nicht vertrauenswürdig. Sie treffen manchmal unlogische Aussagen oder geben selbstsicher Unwahrheiten als Tatsachen aus. »Sie sprechen von Einhörnern, vergessen dann aber, dass die Fabelwesen nur ein Horn besitzen«, sagt der Mathematiker und KI-Experte Jason Rute von IBM Research.

Dahinter steckt mehr als nur ein Programmierfehler. Sprachmodelle können ihre Fehler nur schwer erkennen, was ihre Leistung einschränkt. Aber nicht jede KI leidet unter dieser Schwäche. Seit einigen Jahren gibt es Algorithmen, die durch »Reinforcement Learning« aus ihren Fehlern lernen – und so zu Meistern von strategischen Spielen wie Schach oder Go werden. Diese Fähigkeiten beherrschen Sprachmodelle wie ChatGPT bisher jedoch nicht.

»Wir wollen kein Sprachmodell schaffen, das einfach nur wie ein Mensch spricht«, sagt Yuhuai Wu von Google AI. »Wir wollen, dass es versteht, worüber es redet.« Wu hat 2022 zusammen mit seinem Team zwei Arbeiten veröffentlicht, die das ermöglichen könnten. Auf den ersten Blick geht es dabei um eine sehr spezifische Anwendung: künstlicher Intelligenz Mathematik beibringen. Doch durch diese Fähigkeit könnten Computer künftig logische Schlüsse ziehen, hoffen die Fachleute.

In der ersten Arbeit haben die Forscher einem Sprachmodell beigebracht, mathematische Aussagen in einen formalen Code zu übersetzen, damit ein »Beweisassistent« sie überprüfen kann. Der Ansatz ist nicht neu. Seit Jahrzehnten gibt es Bemühungen, Beweise in Computercode zu übertragen – ein Prozess, der als Formalisierung bezeichnet wird. Der Vorteil davon liegt auf der Hand: Wenn man eine Argumentation als Code darstellt und ein Computer diesen ohne Fehler ausführt, dann ist die Argumentationskette zwangsläufig korrekt. Allerdings brauchen Menschen hunderte oder gar tausende von Stunden, um einen einzigen Beweis zu formalisieren, weshalb Mathematikerinnen und Mathematiker nur selten auf Beweisassistenten zurückgreifen.

Um den Aufwand zu verringern, versuchen KI-Experten nun Sprachmodellen beizubringen, mathematische Aussagen automatisch in eine »formale Sprache« zu verwandeln. KI-Programme wie GPT oder DeepL können bereits erfolgreich menschliche Sprachen ineinander übersetzen. Aber die Übertragung von Mathematik in Code ist deutlich schwieriger. Es gibt viel weniger Übersetzungsbeispiele, mit denen man eine KI trainieren kann. Außerdem enthalten formale Sprachen nicht immer den gesamten Wortschatz, der in einem ausgeschriebenen Beweis vorkommt.

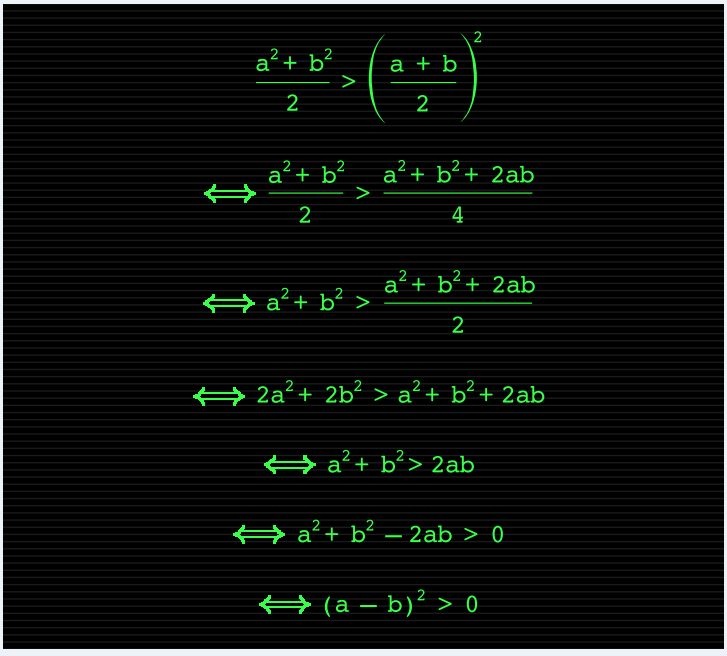
Schritt für Schritt ans Ziel

Forscherinnen und Forscher von Google haben einem Sprachmodell namens Minerva beigebracht, Rechenaufgaben zu lösen und die einzelnen Zwischenschritte anzuzeigen.

Eingabe: Zeige, dass für alle *a* und *b*, wobei a ≠ b gilt:

$$\frac{a^2+b^2}{2} > \left(\frac{a+b}{2}\right)^2$$

Ausgabe:



MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Das ist korrekt, da das Quadrat einer reellen Zahl positiv ist.

KI als Übersetzer

Deshalb haben sich die Fachleute entschieden, zunächst nur kurze Aussagen von einer KI übersetzen zu lassen – und nicht gleich ganze Beweise. Dafür haben sie mit dem Sprachmodell »Codex« gearbeitet, das sich auf GPT-3 (eine Vorgängerversion von ChatGPT) stützt, zusätzlich aber mit Daten aus Quellen wie GitHub trainiert wurde. Um Codex das Formalisieren beizubringen, übergaben die Forscherinnen und Forscher der KI nur zwei Beispiele: je ein mathematisches Problem in natürlicher Sprache und dessen formale Code-Übersetzung.

Nach diesem spärlichen Tutorial fütterten sie Codex mit knapp 4000 Aufgaben aus Highschool-Wettbewerben. Das Ergebnis scheint auf den ersten Blick nicht sonderlich beeindruckend: Die Übersetzungen in die formale Sprache »Isabelle/HOL« waren in 70 Prozent der Fälle falsch. »Manchmal weiß das Sprachmodell zum Beispiel nicht, was der Isabelle-Ausdruck für ›Primzahl‹ oder für ›Fakultät‹ ist – und erfindet es einfach. Das ist das größte Problem bei diesen Modellen«, so Rute, »sie raten oft.« Doch für die Fachleute war nicht

wichtig, dass Codex in 70 Prozent der Fälle versagte, sondern dass die KI bei 30 Prozent erfolgreich war – und das, nachdem sie bloß zwei Beispiele gesehen hatte!

Das verdeutlicht eine interessante Eigenschaft von Sprachmodellen: Mit genügend allgemeinen Trainingsdaten lernen sie nicht nur, natürliche Sprache zu verarbeiten, sondern erlangen gleichzeitig weitere Fähigkeiten. Codex war vor dieser Forschungsarbeit nie darauf trainiert worden, Aussagen in formalen Code zu übersetzen. Aber durch das Training mit den GitHub-Daten war die KI bereits mit Isabelle/HOL vertraut, und durch andere Internetseiten kannte sie mathematische Probleme. Deshalb genügte es, Codex nur zwei Beispiele für das Gewünschte zu zeigen. »Wirklich erstaunlich ist, dass die Autoren nicht viel getan haben«, betont Rute. »Das Modell besaß bereits die Fähigkeit für diese Aufgabe.« Etwas Ähnliches konnte das Team um Wu beobachten, als es einem Sprachmodell nicht nur beibrachte, Rechenaufgaben zu übersetzen, sondern sie zu lösen.

Damit beschäftigt sich die zweite Arbeit der Forscherinnen und Forscher. In diesem Fall trainierten sie eine KI, Matheaufgaben auf Highschool-Niveau Schritt für Schritt zu berechnen. Zum Beispiel: »Eine Gerade parallel zu $y = 4x + 6$ verläuft durch den Punkt (5, 10). Wie lautet die y-Koordinate des Punkts, an dem diese Gerade die y-Achse schneidet?« Dafür griffen die Fachleute auf die Google-KI PaLM zurück, die wie GPT-3 natürliche Sprache verarbeiten kann, und fütterten sie zusätzlich mit mathematischen Inhalten von Internetseiten wie ArXiv. Das erweiterte KI-Modell nannten sie »Minerva«.

Um den Algorithmus auf seine bevorstehende Aufgabe vorzubereiten, präsentierten ihm die Forscherinnen und Forscher vier Beispiele: schrittweise ausformulierte Lösungswege für mathematische Textaufgaben. Im Praxistest schnitt Minerva dann je nach Themenfeld unterschiedlich ab. In Algebra beantwortete es die Fragen in etwas mehr als der Hälfte der Fälle richtig, während es bei Geometrie häufiger falsch lag.

Um die Ergebnisse einzuordnen, mussten die Autorinnen und Autoren sicherstellen, dass Minerva die Fragen nicht nur deshalb richtig beantwortet, weil es diese oder ähnliche Aufgaben bereits aus den Trainingsdaten kannte. »In den Modellen stecken so viele Informationen, dass sie eine Standardaufgabe sehr wahrscheinlich schon einmal gesehen haben«, erklärt Rute. Um dieser Möglichkeit vorzubeugen, sollte Minerva eine polnische Mathematikprüfung aus dem Jahr 2022 lösen, die erst nach dem Training veröffentlicht wurde. Die KI hat beeindruckende 65 Prozent der Fragen richtig beantwortet. Das deutet auch in diesem Fall darauf hin, dass sie bereits über die erforderlichen Fähigkeiten verfügte, bevor man ihr die vier ausgewählten Beispielaufgaben mit Lösungen übergab. »Das ist eine Lektion, die wir beim Deep Learning immer wieder lernen: Skalierung hilft erstaunlich gut bei vielen Aufgaben«, sagt Guy Gur-Ari, der Koautor der Studie ist.

Die Forscherinnen und Forscher konnten Minervas Leistung sogar steigern, indem sie das Programm ein Problem mehrmals lösen ließen, und das am häufigsten genannte Ergebnis auswählten. Dadurch stieg der Anteil korrekter Antworten in manchen Fällen von 33 auf 50 Prozent an. Was noch erstaunlicher ist: »Wenn man ein Sprachmodell bittet, sich Schritt für Schritt zu erklären, erhöht sich die Genauigkeit immens«, erklärt der Mathematiker Siddhartha Gadgil vom Indian Institute of Science in Bangalore. Diese Methode scheint für KIs dieselben Vorteile zu bieten wie für Menschen. Man ist gezwungen, sich mehr Zeit zu nehmen und widmet dadurch jedem Aufgabenteil mehr Aufmerksamkeit.

Sich selbst korrigieren

Die Arbeit von Minerva ist zwar beeindruckend, hat aber einen erheblichen Nachteil. Die KI kann nicht überprüfen, ob sie eine Frage korrekt beantwortet hat. Selbst wenn sie richtig lag, kann sie nicht sicherstellen, dass die Zwischenschritte fehlerfrei waren. »Manchmal kommen die Programme zu falsch positiven Ergebnissen mit falschen Begründungen für richtige Antworten«, sagt Gadgil. Deshalb ist das Modell auf menschliches Feedback angewiesen, um besser zu werden. Das ist jedoch ein langwieri-

Beispiel für eine Übersetzung in einer formale Sprache

Mathematische Aussage: Es gibt keine Funktion f von den natürlichen Zahlen in die natürlichen Zahlen, so dass für alle n gilt: $f(f(n)) = n + 1987$.

```
theorem
    fixes f :: "nat \<Rightarrow> nat"
    assumes "\<forall> n. f (f n) = n + 1987"
    shows False
```

MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Wenn man diese Aussage in einen Beweisassistenten eingibt, kommt das Ergebnis »false« heraus, da die Aussage falsch ist.

ger und aufwändiger Prozess. »Ich glaube nicht, dass dieser Ansatz für komplizierte Probleme geeignet ist«, sagt Christian Szegedy von Google und Mitverfasser der Arbeit.

Stattdessen möchten die Forscherinnen und Forscher die mathematischen Fähigkeiten der Maschinen mit denselben Techniken verbessern, die es KIs wie AlphaGo ermöglicht haben, die weltbesten Menschen bei strategischen Aufgaben wie Brettspielen zu schlagen. Entscheidend ist dabei der Einsatz von Reinforcement Learning, das einer KI beibringt, zu erkennen, welcher Spielzug gut ist. Wenn AlphaGo eine Go-Partei verliert, analysiert das Programm die relevanten Spielzüge und lernt aus ihren Fehlern. Für solche Systeme braucht man jede Menge Trainingsdaten. »Wenn man mit natürlicher Sprache oder Minerva arbeitet, ist das kein Problem: Das ganze Internet ist voll Mathematik. Aber man kann damit kein Reinforcement Learning machen«, sagt Wu. Denn die KI kann nicht beurteilen, welcher Rechenschritt »gut« war. Sie müsste erst wissen, welche Schritte überhaupt zulässig sind und was ein richtiges Ergebnis ist – und dafür muss sie Berechnungen verifizieren können.

Beweisassistenten könnten eine Lösung bieten. Allerdings gibt es zu diesen nur wenige Daten. »Wir brauchen eine Art Brücke, um von einer Seite zur anderen zu gelangen«, sagt Wu. Ein Programm wie Codex könnte diese Verbindung sein: Eine KI könnte ein mathematisches Problem zunächst formalisieren, es dann lösen und das Ergebnis anschließend mit einem Beweisassistenten überprüfen. Das würde das für das Reinforcement Learning notwendige Feedback liefern, damit die Algorithmen aus ihren Fehlern lernen. Am Ende könnte die KI zu einer beweisbar korrekten Antwort kommen, mit allen gewünschten Zwischenschritten.

KI-Forscher haben noch ehrgeizigere Ziele vor Augen. Denn die Mathematik ist ein perfektes Versuchsfeld, um maschinelle Schlussfolgerungen zu entwickeln. Wenn ein Computer effektiv über das Fach nachdenken kann, so die Überlegung, sollte er ganz natürlich auch andere Fähigkeiten erwerben: etwa programmieren oder medizinische Diagnosen stellen – und vielleicht lernt es, widersprüchliche Details in einer Geschichte über Einhörner aufzudecken. ◂

Kevin Hartnett ist Wissenschaftsjournalist in Columbia, South Carolina.

QUELLEN

Wu, Y. et al.: Autoformalization with large language models. ArXiv 2205.12615, 2022

Wu, Y. et al.: Solving quantitative reasoning problems with language models. ArXiv 2206.14858, 2022

Quantamagazine

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »To Teach Computers Math, Researchers Merge AI Approaches« 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.

Spektrum der Wissenschaft

Chefredaktion: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser
Redaktion: Manon Bischoff, Dr. Andreas Jahn, Dr. Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang, Mike Zeitz (stellv. Redaktionsleiter); E-Mail: redaktion@spektrum.de
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: 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
Assistenz Geschäftsleitung: Stefanie Lacher
Herstellung: Natalie Schäfer
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744
Leser- und Bestellservice: Estefanny Espinosa de Rojas, Helga Emmerich, Sabine Häusser, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, **Vertretungsberechtigter:** Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 9,80 (D/A/L), CHF 14,–; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 105,60; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 82,10. 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, Tel.: 06221 9126-600
Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 44 vom 1.1. 2023.
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: © 2023 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Laura Helmuth
President: Kimberly Lau

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