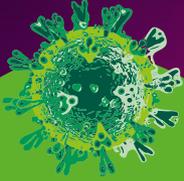


5.20

# Spektrum

der Wissenschaft



**Covid-19-  
PANDEMIE**

## Rätsel Dunkle Energie

Gibt es die geheimnisvolle  
Kraft wirklich?

**125 JAHRE RÖNTGENSTRAHLEN** Entdeckung mit ungeahnten Anwendungen  
**MONSTERWELLEN** Wie entstehen die tödlichen Wasserberge?  
**DENISOVANER** Rekonstruktion eines ausgestorbenen Verwandten

www.Spektrum.de 5.20

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



# KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

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

€ 4,99  
je digitale  
Ausgabe



Bestellmöglichkeit und über 250 weitere Ausgaben:  
[www.spektrum.de/kompakt](http://www.spektrum.de/kompakt)



# EDITORIAL HERAUSFORDERUNG COVID-19

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur  
lingenhoehl@spektrum.de

▶ Während ich diese Zeilen schreibe, sitze ich im Homeoffice – so wie praktisch alle Kolleginnen und Kollegen von »Spektrum der Wissenschaft«. Wann wir uns das nächste Mal in Person treffen können, steht zu diesem Zeitpunkt noch nicht fest. Die weltweite Ausbreitung des neu beschriebenen Coronavirus Sars-CoV-2 und der damit verbundenen Krankheit namens Covid-19 beeinflusst natürlich auch uns und unsere Arbeit und stellt uns vor völlig neue Herausforderungen.

Wir müssen uns umorganisieren und teilweise völlig neue Kanäle nutzen, um Ihr Magazin weiterhin produzieren zu können. Ich bitte Sie deshalb auch um Ihr Verständnis, wenn wir in den folgenden Ausgaben trotz aller Bemühungen punktuell vielleicht nicht ganz die hohe Qualität erreichen, die Sie von uns gewohnt sind und die wir Ihnen gerne liefern würden.

Ähnlich schnell, wie sich das Virus ausbreitet, gelangt die Wissenschaft zu neuen Erkenntnissen. Täglich werden Studien veröffentlicht, die das Genom des Erregers beschreiben beziehungsweise welche Erkrankungen es auslöst oder woher es stammt. Eine Hypothese geht davon aus, dass Sars-CoV-2 ursprünglich in Fledermäusen vorkam und von dort auf einem Wildtiermarkt womöglich über Schuppentiere auf uns Menschen übergang. Die Virologin Shi Zhengli studiert seit Jahrzehnten Coronaviren in Fledermäusen und warnt, dass Sars-CoV-2 nicht das letzte Coronavirus gewesen sein wird, das den Wirt wechselt. Ein Porträt der Wissenschaftlerin und ihrer Arbeit können Sie ab S. 32 lesen.

Ein weiterer Artikel im Heft widmet sich der Modellierung von Epidemien (S. 74): Gerade bei einem solchen weltweiten Ausbruch kommt es darauf an, möglichst gut vorhersagen zu können, wie sich das Geschehen weiterentwickelt. Covid-19 ist eine globale Herausforderung, die wir nur mit vollem Einsatz auch der Wissenschaft bewältigen können.

Bleiben Sie gesund!

**NEU AM KIOSK!**

Deutschlands Geschichte ist voller Rätsel. Einige davon beleuchten wir in der ersten Ausgabe unseres neuen Magazins **Spektrum GESCHICHTE**.



IN DIESER AUSGABE



## MICHAEL HASLAM

Der britische Archäologe gräbt Steinwerkzeuge aus – allerdings nicht von Menschen, sondern von Tieren (S. 38).



WELLDOME COLLECTION  
(WELLDOME COLLECTION)  
WELLDOME COLLECTION  
(WELLDOME COLLECTION)  
LICENSES (P/4/L) (LEGAL CODE)

Neue Serie

## WILHELM RÖNTGEN

Vor 125 Jahren fand der Würzburger Physiker die heute nach ihm benannte Strahlung. Unsere Serie erzählt die Geschichte der Entdeckung, der revolutionäre Anwendungen folgten (S. 68).



MPF FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

## JEAN-JACQUES HUBLIN

Ab S. 78 berichtet der Paläoanthropologe, wie er und seine Kollegen vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig sich ein zunehmend detaillierteres Bild von der 2010 entdeckten Menschenform der Denisovaner machen.

# INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

22 FORSCHUNG AKTUELL

## Metallischer Wasserstoff

Fortschritte auf dem Weg zum perfekten Leiter.

## Gegen den Strom

Unter bestimmten Bedingungen schwimmen Bakterien stromaufwärts.

## Revolution in der linearen Algebra

Physiker decken überraschenden mathematischen Zusammenhang auf.

## So kalt wie noch nie

Chemiker beobachten eine Reaktion bei 500 Nanokelvin.

31 SPRINGERS EINWÜRFE

## Digitaler Energiehunger

Datenverarbeitung braucht jede Menge Strom.

45 ZEITREISE

60 SCHLICHTING!

## Wie Tau Pflanzen trinkt

Blätter schöpfen Feuchtigkeit direkt aus der Luft.

73 FREISTETTERS FORMELWELT

## Reise zu den Sternen

Manchmal reist man schneller, wenn man sich Zeit lässt.

86 REZENSIONEN

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

12 ASTROPHYSIK **STREIT UM DIE DUNKLE ENERGIE**

Zwei Forscherteams stellen öffentlichkeitswirksam in Frage, ob das Weltall beschleunigt expandiert. Die Debatte wirft ein Schlaglicht auf eine der großen Unbekannten der Kosmologie.

Von Robert Gast

32 MEDIZIN **DIE VIRENJÄGERIN**



**Covid-19-PANDEMIE**

Fledermäuse bilden ein natürliches Reservoir für Coronaviren. Von ihnen stammt wohl auch der Erreger der aktuell grassierenden Covid-19-Pandemie.

Von Jane Qiu

38 PRIMATENARCHÄOLOGIE **DIE ANDEREN WERKZEUGBAUER**

Wissenschaftler graben mit archäologischen Methoden nach kulturellen Überresten – von Tieren.

Von Michael Haslam

46 GEOLOGIE **EINE MILLION JAHRE REGEN**

Möglicherweise verdanken die Dinosaurier ihren Aufstieg einer sehr langen Regenperiode vor etwa 232 Millionen Jahren.

Von Michael Marshall

52 AERODYNAMIK **DAS GEHEIMNIS DES FLIEGENS**

Streng mathematisch ist zwar klar, warum Flugzeuge in der Luft bleiben. Aber es fehlt an einem gleichermaßen anschaulichen wie korrekten Modell.

Von Ed Regis

62 OZEANE **MONSTERWELLEN AUF DER SPUR**

Lange galten sie als Seemannsgarn, doch nun soll ein statistisches Modell die Giganten des Meeres vorhersagen können.

Von Charlie Wood

68 RÖNTGENSTRAHLUNG **ALS DIE WELT DURCHSICHTIG WURDE**

**Neue Serie: Die Röntgen-Revolution (Teil 1)** Wilhelm Röntgen revolutionierte durch die nach ihm benannte Strahlung verschiedenste wissenschaftliche Bereiche, von der Physik bis zur Medizin.

Von Dirk Eidemüller

74 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **WIE EINE EPIDEMIE VERLÄUFT**



**Covid-19-PANDEMIE**

Mathematische Modellbildung kann zumindest Teilantworten auf solche Fragen bieten.

Von Christoph Pöppe

78 DENISOVANER **ALLES BEGANN MIT EINEM FINGERKNÖCHELCHEN**

Die Denisovaner sind fast nur aus Genanalysen bekannt. Um ihre Anatomie zu rekonstruieren, suchen Paläoanthropologen fieberhaft nach Fossilien.

Von Jean-Jacques Hublin

TITELBILD:  
GALAXIEN: ESA/HUBBLE & NASA, BELUCS (WWW.SPACETELESCOPE.ORG/  
IMAGES/POTW1833A) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/  
BY/4.0/LEGALCODE); SCHEIBE: LHG / STOCK.ADOBE.COM; COMPOSING:  
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; VIRUS: KOTO\_FEJA / GETTY IMAGES /  
ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

12

TITELTHEMA  
STREIT UM DIE  
DUNKLE ENERGIE



GALAXIEN: ESA/HUBBLE & NASA, REIUS (WWW.SPACETELESKOPE.ORG/IMAGES/POTW193241) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/ LICENSE/SRYA.0/LGALCODE); SCHEIBE: JIG / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

32

MEDIZIN  
DIE VIRENJÄGERIN



WUHAN INSTITUTE OF VIROLOGY



SMURRAN/CHESTER / FELIX / TUBS  
(TINYURL.COM/UWUWMS) / CC  
BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/  
LICENSE/SRYA.0/LGALCODE);  
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER  
WISSENSCHAFT

74

MATHEMATISCHE  
UNTERHALTUNGEN  
WIE EINE EPIDEMIE  
VERLÄUFT

68

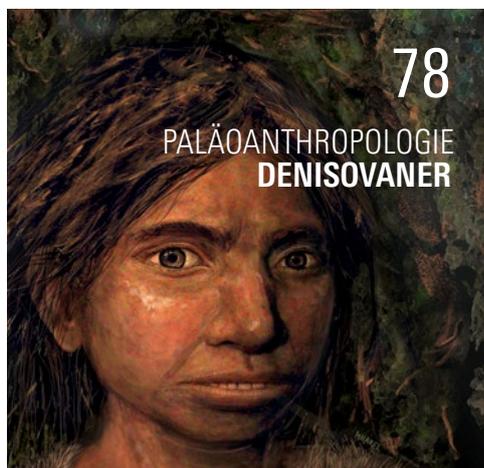
RÖNTGENSTRAHLUNG  
ALS DIE WELT  
DURCHSICHTIG WURDE



W.C. RÖNTGEN: HANDE DES ANATOMEN GEHEIMRATZ  
VON KÖLLMEER IN WÜRZBURG, 23. JAN. 1896

78

PALÄOANTHROPOLOGIE  
DENISOVANER



BARBARA HABEL (MAXANILLUSTRATION.COM)



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

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

# SPEKTROGRAMM

A detailed electron micrograph showing numerous SARS-CoV-2 virus particles. The particles are spherical, appearing as bright red and orange spheres against a dark background. They are scattered across the field of view, with some appearing in clusters. The background shows a complex, fibrous structure, likely representing the cellular environment where the virus is present.

## AUFNAHME DES CORONAVIRUS

► So sieht er im Elektronenmikroskop aus – Sars-CoV-2, der Erreger der aktuellen Corona-Pandemie. Die kleinen roten Kugeln sind Exemplare des Virus, das in einem Laborversuch in den USA menschliche Zellen befallen hat. Letztere produzierten daraufhin Kopien des Virus, die – wie in der Aufnahme sichtbar – aus den Zellen austreten.

Typisch für alle Arten von Coronaviren sind Proteine auf der Virushülle, die man hier allenfalls erahnen kann. Sie ähneln einem Strahlenkranz, was den Erregern ihren Namen gegeben hat: Er stammt vom lateinischen Wort für Kranz oder Krone, »corona«. Mit den Proteinen docken Coronaviren an menschliche Körperzellen an.

Im Fall von Sars-CoV, dem Erreger der Sars-Epidemie von 2002 und 2003, gewährte ein Enzym namens ACE2, das sich auf Lungenzellen findet, dem Virus Einlass in die Zelle. Forscher halten es auf Grund der Verwandtschaft mit Sars-CoV und erster Laborversuche derzeit für wahrscheinlich, dass der neue Erreger ebenfalls dieses Enzym als Eintrittspforte nutzt.

*National Institute of Allergy and Infectious Diseases, Februar 2020*



## ARCHÄOLOGIE KÖNIGLICHER SPIELSTEIN

► Erst auf den zweiten Blick – dann nämlich, wenn Licht durch ihn hindurchscheint – offenbart dieses Fundstück seine Schönheit: Ein aus blauem Glas gefertigter Stein, den Menschen im Zeitraum 700 bis 900 n. Chr. hergestellt haben. Zum Einsatz kam er offenbar bei einem Brettspiel namens Tafl. Die Knubbel auf seiner Oberseite deuten darauf hin, dass es sich um eine Königsfigur handelte.

Vermutlich gehörte die kunstvoll verzierte Marmor einem Mitglied der angelsächsischen Oberschicht. Denn vor allem sie spielte das Spiel, dessen Name sich vom lateinischen Wort »tabula« (»Spielbrett«) ableitet. Es war im gesamten Nordsee-raum verbreitet, allerdings schuf sich jede Gemeinschaft

**Bevor Schach nach Nord-europa kam, spielte der angelsächsische Adel das Brettspiel Tafl. Archäologen haben nun in Nordengland einen besonders prächtigen Spielstein entdeckt, der vermutlich die Rolle des Königs einnahm.**

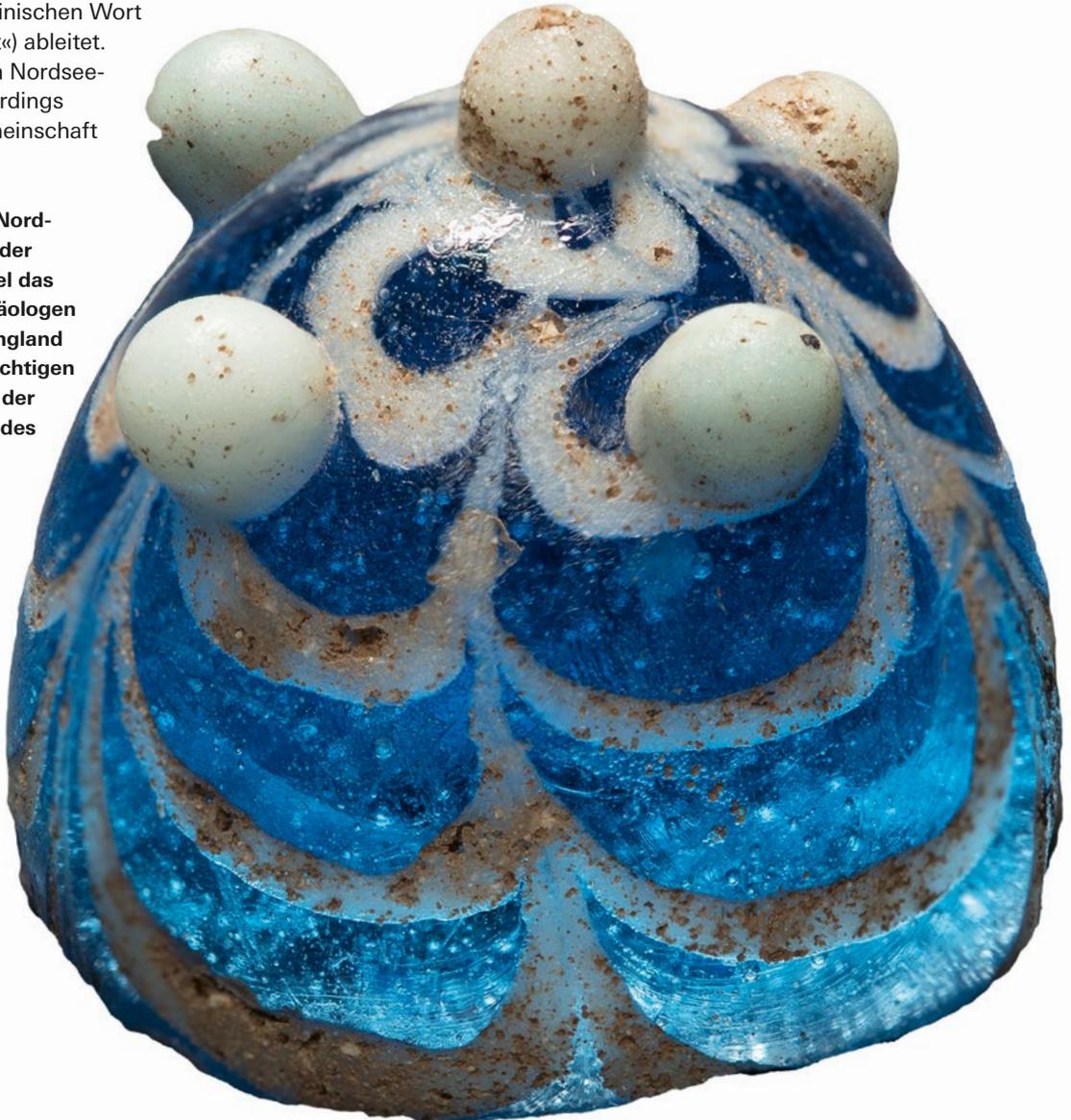
ihre eigenen Spielregeln. Erst als im 11. bis 12. Jahrhundert das Schachspiel aufkam, verlor Tafl an Popularität.

Archäologen haben den »König« bei Ausgrabungen im Kloster Lindisfarne entdeckt, auf der gleichnamigen Insel an der Nordostküste Englands. Sie war Schauplatz des ersten echten Wikingerangriffs: Im Jahr 793 trafen hier die raublustigen Nordmänner auf völlig unvorbereitete Mönche und plünderten das reiche Kloster.

Der gläserne Tafl-Spielstein ist auch deshalb von Bedeutung, da es auf den

Britischen Inseln bisher nur einen einzigen vergleichbaren Fund gibt. Das verdeutliche, dass es sich bei dem Kloster um weit mehr als ein abgelegenes Nest handelte, berichtet das Team von der Durham University und der spendenfinanzierten Archäologiefirma DigVentures. Vielmehr sei es ein Anziehungspunkt für Pilger gewesen, aber auch ein Rückzugsort für Könige und Adlige – die zum Zeitvertreib offenbar hin und wieder Tafl spielten.

*Pressemitteilung DigVentures, Februar 2020*



## SONNENSYSTEM STICKSTOFFVERSTECK AUF KOMETEN

Die chemische Zusammensetzung von Kometen stellt Astronomen seit Langem vor ein Rätsel: Beobachtungen zufolge enthalten die kosmischen Brocken deutlich weniger Stickstoff als die Staubscheibe, aus der sie zusammen mit unserem Sonnensystem vor knapp 4,6 Milliarden Jahren entstanden sind. Ein Team um Olivier Poch von der Université Grenoble Alpes präsentiert nun eine mögliche Erklärung: Offenbar gibt es in Kometen ein verstecktes Stickstoffreservoir, das man bei bisherigen Beobachtungen übersehen hat.

Dafür sprechen jedenfalls Laborexperimente, in denen die Gruppe die chemischen Eigenschaften von Kometenstaub untersucht hat, sowie die Daten der ESA-Sonde Rosetta. Sie besuchte zwischen 2014 und 2016 den Kometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko. Laut einem der Bordinstrumente reflektierte die Oberfläche des Himmelskörpers bei einer bestimmten Wellenlänge auffällig wenig Infrarotlicht. Die Planetologen um Poch meinen jetzt die Erklärung dafür gefunden zu haben: Die Strahlung

wird von einem Mix aus Staub und stickstoffhaltigen Ammoniumsalsen absorbiert.

Das Szenario passt auch zu älteren Forschungsarbeiten: Bereits im Januar hatte ein Team der Universität Bern Hinweise auf Ammoniumsalsen veröffentlicht, die sich von der Kometenoberfläche gelöst und den Weg in

eines der Messinstrumente an Bord von Rosetta gefunden haben. Offen ist noch, wie viel Stickstoff in dieser Form auf Kometen vorliegt. Den Forschern zufolge könnten bis zu 40 Prozent der äußeren Kruste daraus bestehen - was genug wäre, um das Rätsel des fehlenden Stickstoffs zu erklären.

*Science 10.1126/science.aaw7462, 2020*

## MEDIZIN RAUCH AUS DRITTER HAND

Selbst in gut gelüfteten Innenräumen reichern sich erhebliche Mengen schädlicher Chemikalien aus Zigarettenrauch an, haben Wissenschaftler der Yale University und des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz herausgefunden. Das Team um Drew Gentner hat in einem Kino der rheinland-pfälzischen Landeshauptstadt Messgeräte installiert, die während des laufenden Betriebs die Luftqualität erfassen. Das Ergebnis: Wer in dem Kino einen Film anschaut, atmete das Äquivalent von ein bis zehn Zigaretten Passivrauch ein.

Auch gesundheitsschädliche Stoffe wie Benzol oder Formaldehyd ent-

deckten die Forscher in der Luft. Die Substanzen stammten dabei nicht aus dem Raum selbst: Dort herrscht seit 15 Jahren Rauchverbot, außerdem ist eine gute Lüftung installiert. Stattdessen gehen die schädlichen Dämpfe offenbar von Besuchern aus, oder besser gesagt: ihrer Haut, ihren Haaren und ihren verrauchten Kleidern. Jedenfalls stieg die Konzentration der Schadstoffe jedes Mal an, wenn sich der Saal füllte, und sank danach wieder langsam ab.

Die Umweltwissenschaftler beobachteten auch, dass die Belastung bei Filmen für Erwachsene im Schnitt merklich höher ausfiel als in Sälen, in

denen Kinderfilme liefen. Experten bezeichnen das Phänomen in Analogie zum »second-hand smoke«, dem Passivrauchen, als »third-hand smoke«.

Gegen den Rauch aus dritter Hand hilft kein Rauchverbot in direktem Umfeld einer Gaststätte oder eines Versammlungsorts, geben die Forscher zu bedenken. Denn selbst wenn die Raucher unter den Zuschauern weder im Kinosaal noch im Foyer rauchen dürfen, schleppen sie die Schadstoffe früherer Zigaretten offenkundig in den Innenraum ein.

*Science Advances 10.1126/sciadv.aay4109, 2020*



**Der Komet 67P/Tschurjumow-Gerasimenko bekam 2014 Besuch von der Raumsonde Rosetta. Mit Hilfe der damals gesammelten Daten lässt sich ermitteln, aus welchen Materialien Kometen bestehen.**

## PHYSIK FEINSTRUKTUR DER ANTIMATERIE

► Um Antimaterie auf der Erde herzustellen, müssen Wissenschaftler großen Aufwand betreiben. Antiprotonen entstehen beispielsweise bei Kollisionen zwischen Atomkernen, Positronen (die Antiteilchen der Elektronen) bei radioaktiven Zerfällen. Doch da beide Partikelarten beim Kontakt mit gewöhnlicher Materie sofort vernichtet werden, müssen Forscher sie akribisch von der Umwelt abschirmen, wenn sie sie speichern und untersuchen wollen.

Am Genfer Forschungszentrum CERN läuft seit Jahren ein entsprechendes Forschungsprogramm. Mittlerweile gelingt es dort, Antiprotonen und Positronen zu Antiwasserstoff

zusammenzufügen und Hunderte solcher Atome für viele Stunden in einer Vakuumkammer gefangen zu halten. Dadurch lassen sich die genauen Eigenschaften der Antimaterie erforschen.

Bisher ist dabei kein Unterschied zu gewöhnlicher Materie aufgetaucht: An Antiprotonen gebundene Positronen scheinen exakt dieselben Energieniveaus einzunehmen wie Elektronen in einem Wasserstoffatom. Das scheint auch für die »Feinstruktur« zu gelten, wie Physiker der ALPHA-Kollaboration nun berichten. Gemeint ist eine feingliedrige Aufspaltung der Energieniveaus des bohrschen Schalenmodells. Die Unterniveaus gehen

darauf zurück, dass Elektronen je nach Spin-Orientierung unterschiedlich stark an den Atomkern gebunden sind, auch wenn sie zur selben Schale gehören.

Die Forscher fanden außerdem Hinweise auf einen subtilen Effekt, der dieses Schema weiter verfeinert: Bei der so genannten Lamb-Verschiebung verändern Ladungsfluktuationen aus dem Vakuum die Energieniveaus geringfügig. Bereits 1947 hatte der US-Amerikaner Willis Lamb das Phänomen bei Wasserstoff entdeckt. Nun ist klar, dass Antimaterie ebenfalls von ihm betroffen ist.

*Nature 10.1038/s41586-020-2006-5, 2020*

## GESUNDHEIT BESSER HOCKEN STATT SITZEN

► Der menschliche Körper hat sich im Lauf der Evolution an das anstrengende Leben als Jäger und Sammler angepasst. Daher müssen wir uns viel bewegen, wenn wir langfristig gesund bleiben wollen (siehe Spektrum Januar 2020, S. 46). Stundenlanges Sitzen erhöht dagegen das Risiko für Diabetes und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Tatsächlich kennen indigene Volksgruppen wie die Hadza, die im Norden Tansanias leben, kaum derartige Zivilisationskrankheiten.

Der Schlüssel zur Gesundheit liegt jedoch anscheinend nicht nur in der Bewegung, sondern auch in der Art zu ruhen, berichtet ein Team um den Evolutionsbiologen David Raichlen von der University of Southern California. Acht Tage lang verfolgten die Forscher jeden Schritt und Tritt von 16 Männern und 12 Frauen der Hadza – ein Bewegungssensor an deren Oberschenkel machte es möglich.

Demnach bewegten sich die Probanden täglich für ein bis zwei Stunden sehr intensiv und übertrafen damit die von der WHO empfohlene körperli-

che Aktivität von mindestens 150 Minuten pro Woche deutlich. Doch mehr als neun Stunden täglich ruhten die Hadza, das heißt, sie standen oder gingen nicht. Das entspricht etwa der Zeit, die auch Menschen in den USA, den Niederlanden oder Australien im Sitzen verbringen.

Die Werte für Blutfett, Zucker und Cholesterin der Probanden deuteten aber keineswegs auf Herz-Kreislauf-Erkrankungen hin. Daraus schlossen die Forscher, dass weniger die Dauer als die Art des Ruhens wichtig sein muss: Statt wie auf einem Stuhl mit

angewinkelten Beinen saßen die Hadza häufig in einer Art Schneidersitz auf dem Boden, alternativ knieten sie oder kauerten auf einem Stein. Durch an der Muskulatur befestigte Messelektroden stellten die Wissenschaftler fest, dass diese Haltungen die unteren Gliedmaßen stärker beanspruchten als das westliche Sitzen auf einem Stuhl. In der Hocke, in der die Probanden etwa zwei Stunden pro Tag verbrachten, verbrauchten ihre Muskeln beispielsweise 20 bis 40 Prozent der Energie, die sie zum Gehen benötigten.

*PNAS 10.1073/pnas.1911868117, 2020*

**Die Hadza im Norden Tansanias verbringen viel Zeit in der Sitzhocke. Das scheint das Risiko für Herz-Kreislauf-Leiden zu senken.**



## ANTHROPOLOGIE MENSCHHEIT TROTZTE SUPERVULKAN

► Es war mit Abstand die größte Eruption, die Menschen bisher erlebt haben: Als vor 74 000 Jahren der Supervulkan Toba auf Sumatra explodierte, schuf er einen gewaltigen Kratersee, dessen zentrale Insel größer ist als Ibiza. Seine globalen klimatischen Folgen waren jedoch wohl weniger katastrophal als gedacht. Zumindest brachten sie die Menschheit nicht an den Rand des Aussterbens, wie Wissenschaftler zeitweise annahmen. Vielmehr scheint sich das Leben durch die Eruption kaum verändert zu haben, berichten Forscher um Michael Petraglia vom Jenaer Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte.

Dafür spricht jedenfalls ein Fund aus einem Flusstal im zentralindischen Dhaba. Das Team um Petraglia hat dort Erdschichten untersucht, die durch den Tuff der Toba-Eruption voneinander getrennt wurden. Unter und oberhalb des Vulkangesteins entdeckten die Forscher einfache Steinwerkzeuge, die keine nennenswerten Unterschiede aufweisen. Eine solche kulturelle Kontinuität sei nicht

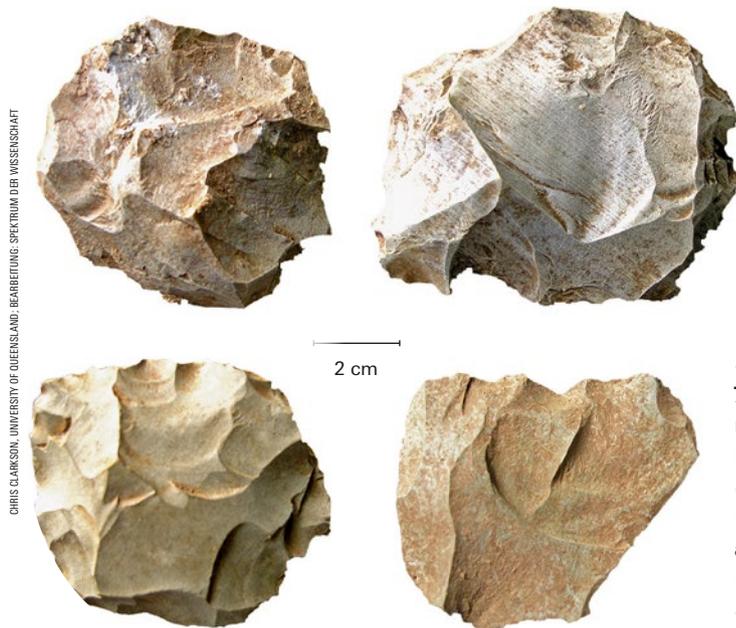
mit der Hypothese vereinbar, dass der gerade erst aus Afrika ausgewanderte *Homo sapiens* durch die Toba-Eruption in die Knie gezwungen wurde, folgern die Archäologen.

Die Werkzeuge entsprächen darüber hinaus jenen, die zur selben Zeit auf der Arabischen Halbinsel sowie in Afrika in Gebrauch waren und später von Menschen nach Australien getragen wurden. Auch das würde nicht zur

Annahme passen, dass ein Großteil der Gemeinschaften infolge des Vulkanausbruchs zu Grunde ging.

Anscheinend veränderte das gewaltige Ereignis die Umwelt weniger stark als vermutet. Oder aber die Jäger und Sammler der Steinzeit konnten sich besser an die neuen Bedingungen anpassen als gedacht.

*Nature Communications* 10.1038/s41467-020-14668-4, 2020



CHRIS CLARKSON, UNIVERSITY OF QUEENSLAND; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

**Schon vor 74 000 Jahren nutzten Menschen Steinwerkzeuge. Davon hielt sie auch der Ausbruch eines Supervulkans nicht ab.**

## BIOLOGIE ÜBERLEBEN UNTER DEM MEERESBODEN

► Selbst in der steinernen Tiefe der Erdkruste kann sich Leben entwickeln: Noch 750 Meter unter dem Meeresgrund existieren Mikroben in trauter Eintracht. Das zeigen Gesteinsproben, die Forscher aus dem Boden eines Tiefseebergs namens Atlantis Bank vor der Küste Madagaskars gewonnen haben. Dort ist die untere Erdkruste frei gelegt und ließ sich von einem Forschungsschiff aus anbohren.

Schon länger ist bekannt, dass Mikroorganismen in der Erdkruste existieren, bisher gibt es jedoch nur begrenzte Informationen über die unteren Bereiche der Schicht. Biologen rätseln seit Längerem darüber, wie

Mikroben in dieser extremen Umgebung überleben können. Denn dort ist es äußerst schwierig, ausreichende Mengen an Kohlenstoff und Energie für Wachstum und andere Prozesse zu gewinnen.

In der Atlantis Bank scheint dies zu gelingen: Die Gruppe um Virginia P. Edgcomb von der Woods Hole Oceanographic Institution in den USA hat eine Reihe von Bakterien, Pilzen und Archaeen gefunden, die Haarrisse in Felsen 10 bis 750 Meter unter dem Meeresboden bewohnen. Um herauszufinden, wie die Mikroben das schaffen, haben die Forscher die Enzymaktivität gemessen und mit

Lipid-Biomarkern, Markergenen und Mikroskopie gearbeitet.

Das Ergebnis: Die Organismengemeinschaft weist mit weniger als 2000 Zellen pro Kubikzentimeter eine äußerst geringe Zelldichte auf. Sie hat sich zum einen an die Bedingungen angepasst, indem sie nur ein niedriges Niveau an Zellaktivität aufrechterhält. Zum anderen ernährt sie sich von Kohlenstoff aus Fragmenten von Aminosäuren und anderen organischen Molekülen, die von den Meeresströmungen in der Tiefe getragen werden.

*Nature* 10.1038/s41586-020-2075-5, 2020

# ASTROPHYSIK ZWEIFEL AN DER DUNKLEN ENERGIE

Zwei Forscherteams stellen in Frage, ob sich das All tatsächlich immer schneller ausdehnt, wie viele Experten vermuten. Doch lässt sich das moderne Weltbild der Kosmologie wirklich so leicht aus den Angeln heben?



Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

» [spektrum.de/artikel/1714776](https://www.spektrum.de/artikel/1714776)

## AUF EINEN BLICK DAS RASENDE UNIVERSUM

- 1 Einige Wissenschaftler melden Zweifel an der Dunklen Energie an, die das All beschleunigt expandieren lassen soll. Sie sei kein reales Phänomen, sondern eine Fehlinterpretation von Messdaten.
- 2 Die Analysen der Kritiker weisen Schwächen auf, nur die wenigsten Forscher schenken ihnen Glauben. Doch die Diskussion könnte dabei helfen, die Messunsicherheiten in der Kosmologie besser zu verstehen.
- 3 Eine der offenen Fragen ist, ob das Weltall tatsächlich in allen Blickrichtungen gleich aussieht – oder ob es in manchen weit entfernten Regionen des Alls andere Strukturen aufweist.

Wie einen Luftballon, in den jemand immer kräftiger hineinbläst – so stellen sich Forscher wie Nobelpreisträger James Peebles (links) das Weltall vor. Oxford-Astrophysiker Subir Sarkar (rechts) und andere Kritiker stellen nun jedoch diese Sichtweise in Frage.





## Von der Expansion zur Beschleunigung

Am Anfang war der Urknall – und seitdem dehnt sich das Weltall immer weiter aus. Damit ist nicht die normale Bewegung von Galaxien gemeint, sondern die Expansion des Raums an sich. Ähnlich wie ein Luftballon, in den jemand Luft bläst, wird der Kosmos immer größer, sämtliche Abstände auf der Ballonoberfläche wachsen. Am stärksten ist der Effekt im Vakuum zwischen Galaxienhaufen, da dort nur wenig Gravitation der Expansion entgegenwirkt. Innerhalb unserer Galaxie ist er hingegen so klein, dass man ihn nicht messen kann.

Bis 1998 gingen viele Forscher davon aus, dass dem Kosmos nach und nach die Puste ausgeht: Seit dem Urknall müsste die Expansion an Schwung verloren haben. Doch das scheint nicht zu stimmen. Zwar ist das All in den ersten sieben Milliarden Jahren seiner Existenz langsamer geworden, da die Gravitation zwischen Massenansammlungen die Expansion abbremste. Seitdem nimmt die Ausdehnung aber Fahrt auf: Die Abstände wachsen heute schneller als vor ein paar Milliarden Jahren. Am besten lässt sich das erklären, wenn das Vakuum eine bisher unbekannte

Energieform enthält, die den kosmischen Luftballon immer weiter aufpumpt: die Dunkle Energie. Derzeit sieht es so aus, als sei ihre Dichte konstant – in jedem Kubikmeter des Alls scheint sich stets gleich viel von ihr zu befinden. Oder anders formuliert: Je größer das All, desto mehr Dunkle Energie gibt es darin.

Da gleichzeitig die Distanzen zwischen Galaxien wachsen, gewinnt die auseinanderstrebende Kraft mit der Zeit die Oberhand. Die Geschwindigkeit, mit der zwei Punkte im All auseinanderfliegen, nimmt immer weiter zu, die Expansion des Alls beschleunigt sich also.

zeug, wenn es darum geht, die Entwicklung des Weltalls zu rekonstruieren. Mit ihrer Hilfe hatten zwei Forscherteams um die späteren Nobelpreisträger Saul Perlmutter, Brian Schmidt und Adam Riess Ende der 1990er Jahre das beschleunigte Universum aus der Taufe gehoben.

1a-Supernova setzen jeweils ungefähr dieselbe Menge an Strahlung frei. Denn die physikalischen Abläufe, die zur Explosion führen, sind bei ihnen stets mehr oder wenig gleich: Ein weißer Zwergstern zieht Materie aus seinem näheren Umfeld an sich. Irgendwann überschreitet er eine kritische Massengrenze, ab der er unter seiner eigenen Schwerkraft in sich zusammenfällt. Der Kollaps setzt schlagartig enorm viel Energie frei, deren Menge bei jedem der Ereignisse ungefähr gleich groß ist.

Forscher können deshalb den Abstand zu uns ermitteln, was bei gewöhnlichen Strahlungsquellen nicht möglich ist. Auf der Erde würde das Prinzip auch mit einer 20-Watt-Glühbirne funktionieren: Entfernt man sich von ihr, wird sie mit jedem Schritt etwas dunkler. Sieht man die Lampe aus der Ferne, kann man aus der wahrgenommenen Helligkeit rekonstruieren, wie viele Schritte sie entfernt sein muss – aber nur, weil man weiß, mit wie viel Watt sie leuchtet.

Das Licht einer Supernova verrät nicht nur ihren Abstand zur Erde. Kosmologen können daraus noch eine weitere Information gewinnen: Hat der Punkt am Firmament einen Rotstich, so hat die Expansion des Raums die Strahlung auf ihrem langen Weg in die Länge gezogen, denn rotes Licht hat eine größere Wellenlänge als blaues. Vergleicht man das Maß dieser »Rotverschiebung« mit der aus der Helligkeit rekonstruierten Entfernung, lässt sich abschätzen, wie stark das All während der Reise gewachsen ist (siehe »Von den Daten zum Weltmodell«, S. 19).

Die Teams um Perlmutter, Schmidt und Riess hatten in den 1990er Jahren dutzende Supernovae beobachtet, die teils Milliarden Lichtjahre entfernt stattgefunden haben. Die

späteren Nobelpreisträger erwarteten eigentlich, ein abbremsendes Universum zu beobachten, da der Schwung aus dem Urknall wegen der sich anziehenden Massen mit der Zeit schwächer geworden sein müsste. Zur Überraschung der Forscher ließen sich die gesammelten Daten jedoch nur dann schlüssig erklären, wenn sich die Ausdehnung des Alls in den letzten paar Milliarden Jahren beschleunigt hat. Beobachtungen aus den vergangenen 20 Jahren haben diesen Trend bestätigt; mittlerweile stützen sich Experten dafür auf mehr als 1000 Supernovae.

Doch im Detail ist die Auswertung der Daten hoch kompliziert. Denn nicht nur die Dunkle Energie kann Licht röter erscheinen lassen, indem sie den Raum zwischen den Weltinseln immer größer werden lässt. Auch die Bewegung einer Galaxie, die von der Schwerkraft ihrer kosmischen Nachbarn von uns weggezogen wird, kann die Wellen strecken – ganz so, wie es der aus der Schulphysik bekannte Dopplereffekt für die Schallwellen eines Krankenwagens besagt. Gleiches gilt für unsere eigene Bewegung durchs All. Sie führt ebenfalls dazu, dass sich die Farbe von Licht leicht verändert.

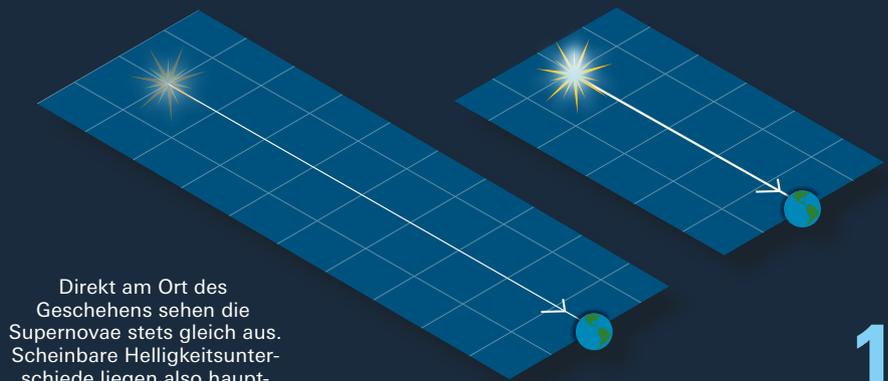
### Jenseits von 500 Millionen Lichtjahren

Wie viel von der gemessenen Rotverschiebung kommt also von der kosmischen Expansion, wie viel von der Relativbewegung von Quelle und Beobachter? Für Kosmologen ist das eine knifflige Frage. Sie versuchen daher, die Bewegung von Galaxien infolge der gewöhnlichen Schwereanziehung so gut wie möglich abzuschätzen. Das Ergebnis nutzen sie dann, um die Rotverschiebung von fernen Supernovae zu korrigieren. Idealerweise bleibt dann nur jener Anteil übrig, der auf die Expansion zurückgeht.

Doch dabei müssen sich die Experten auf eine Grundannahme der Kosmologie verlassen: Das kopernikanische Prinzip. Es besagt vereinfacht ausgedrückt, dass das Uni-

## Vier Schlüssel zur kosmischen Expansion

Das Universum dehnt sich immer rasanter aus. Mit vier verschiedenen Techniken können Astronomen rekonstruieren, wie sich das All in der Vergangenheit entwickelt hat.

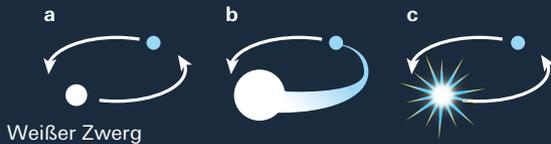


Direkt am Ort des Geschehens sehen die Supernovae stets gleich aus. Scheinbare Helligkeitsunterschiede liegen also hauptsächlich an ihrem Abstand zur Erde.

# 1

### Supernovae des Typs Ia

Bestimmte Explosionen dichter Sterne sind immer ähnlich hell. Ihre scheinbare Leuchtkraft am Himmel liegt demnach nur an unterschiedlichen Entfernungen. Viele der Ereignisse gehen auf Weiße Zwerge zurück, die mit einem zweiten Stern ein Doppelsystem bilden (a), diesem Materie entziehen (b) und schließlich beim Erreichen einer definierten Grenzmasse explodieren (c).

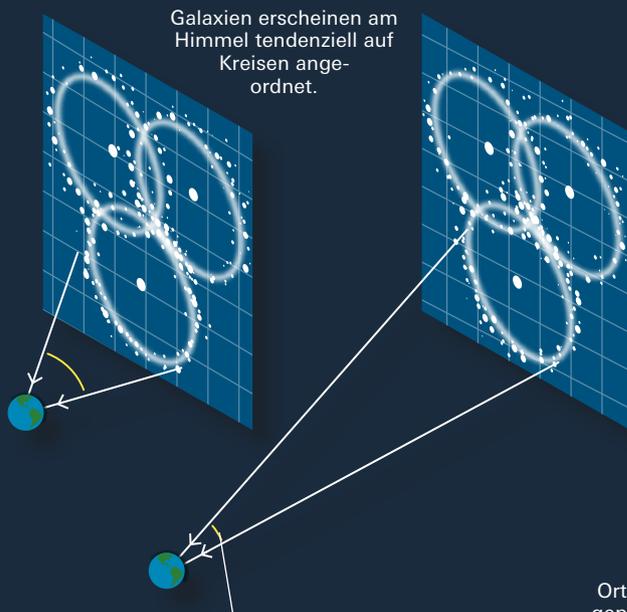


Weißer Zwerg

## Spuren von Schallwellen

# 2

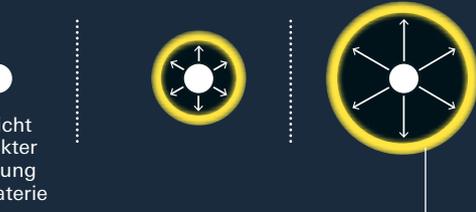
Im frühen Universum breiteten sich Schallwellen aus, bis sich der Kosmos genug abkühlte und Atome entstanden. Die von den Wellen bis dahin zurückgelegte Strecke entspricht im heutigen All 480 Millionen Lichtjahre. Die Distanz prägte sich den Strukturen auf und zeigt sich als kleiner Materieüberschuss auf kugelförmigen Schalen mit ebendiesem Radius. Wir nehmen sie als schwache Ringe von Galaxien wahr.



Galaxien erscheinen am Himmel tendenziell auf Kreisen angeordnet.

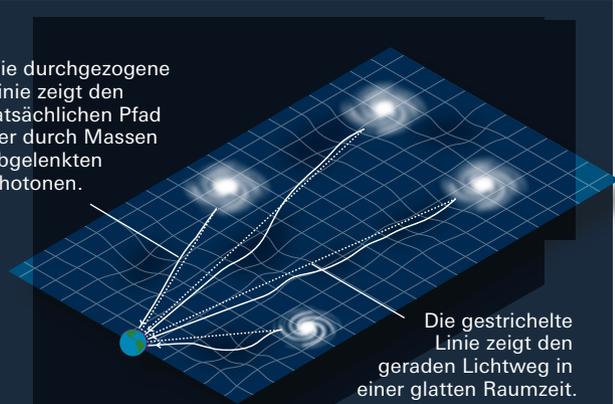
Je weiter die Galaxienkreise entfernt sind, desto kleiner ist der Winkel, unter dem wir sie detektieren. Die Abstände lassen auf die Expansionsgeschichte des Universums schließen.

Ort dicht gepackter Strahlung und Materie



Strahlung riss Materie als Schallwelle mit. Im Zentrum blieb nur Dunkle Materie zurück. So entstanden ringförmige Strukturen. Deren Radius entspricht im heutigen Universum 480 Millionen Lichtjahre.

Die durchgezogene Linie zeigt den tatsächlichen Pfad der durch Massen abgelenkten Photonen.



Die gestrichelte Linie zeigt den geraden Lichtweg in einer glatten Raumzeit.



verzerrtes Galaxienbild im Teleskop

wirkliches Aussehen

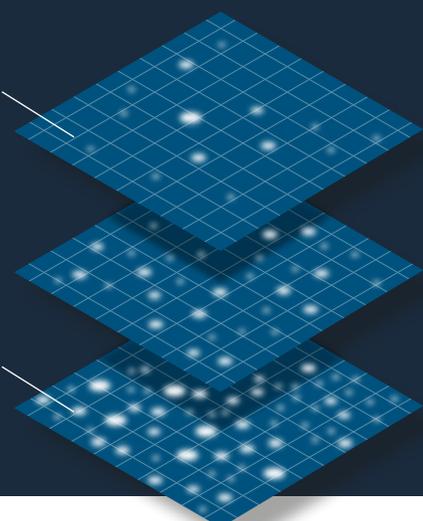
### 3 Gravitationslinsen

Die Schwerkraft massereicher Regionen lenkt das Licht auf dem Weg zur Erde ab und verzerrt Bilder im Teleskop. Forscher vermessen daher viele Millionen Galaxien, vergleichen sie mit der vermuteten wahren Form und erstellen so eine Karte der unsichtbaren Materie zwischen diesen Objekten und der Erde.

### 4 Galaxienhaufen

Die Gravitation zieht einzelne Galaxien allmählich zu Haufen zusammen. Forscher kartieren viele dieser Gebilde und erfahren so etwas über die zeitliche Entwicklung der kosmischen Strukturen und wie die Dunkle Energie sie beeinflusst hat.

In großen Entfernungen – und damit vor langer Zeit – haben sich noch nicht viele Galaxien zusammengeballt.



In unserer näheren Umgebung befinden sich viel mehr Galaxienhaufen.

versum überall gleich ist, Physiker sprechen von »Isotropie«. Wenn man auf der Südhalbkugel gen Nachthimmel blickt, sollten die dort sichtbaren Galaxien denselben Regeln gehorchen wie kosmische Objekte am nördlichen Firmament. Außerdem sollte die Materie im All gleichmäßig verteilt sein – zumindest wenn man die größten Strukturen im All betrachtet.

Doch kann die Menschheit mit Sicherheit sagen, dass beides der Fall ist? Schließlich kann sie längst nicht das ganze Universum einsehen, sondern nur jenen Teil, aus dem Licht uns in den 13,8 Milliarden Jahren seit dem Urknall erreichen konnte. Und selbst über die sichtbaren Regionen kann sie in Anbetracht der gigantischen Entfernungen oft nur grobe Aussagen machen.

Fest steht auch, dass der Kosmos alles andere als statisch ist. So scheint unsere Milchstraße Teil eines größeren Materiestroms zu sein, der uns und unsere Nachbarn in Richtung des Sternbilds Wasserschlange auf der Südhalbkugel bewegt. Das sieht man unter anderem am kosmischen Mikrowellenhintergrund, einer Art Nachglimmen des Urknalls, das an jedem Punkt des Himmels messbar ist. Die Strahlung scheint mit einer geringfügig höheren Energie auf uns einzuprasseln, wenn man in Richtung des Sternbilds Wasserschlange blickt. Unsere Galaxiengruppe scheint also rasant durchs All zu reisen: Relativ zu einem Beobachter, der die Hintergrundstrahlung isotrop wahrnehmen würde, müssten es 620 Kilometer pro Sekunde sein.

#### Im Bann des großen Attraktors

Kosmologen kennen das Problem seit Langem. Entsprechend korrigieren sie die Rotverschiebung für ferne Supernovae in ihren Analyse und planen dabei eine Art Sicherheitsmarge ein. Die Frage ist, ob die Experten dabei umsichtig genug vorgehen – oder ob sie die Bewegungen von Quelle und Beobachter systematisch falsch einschätzen.

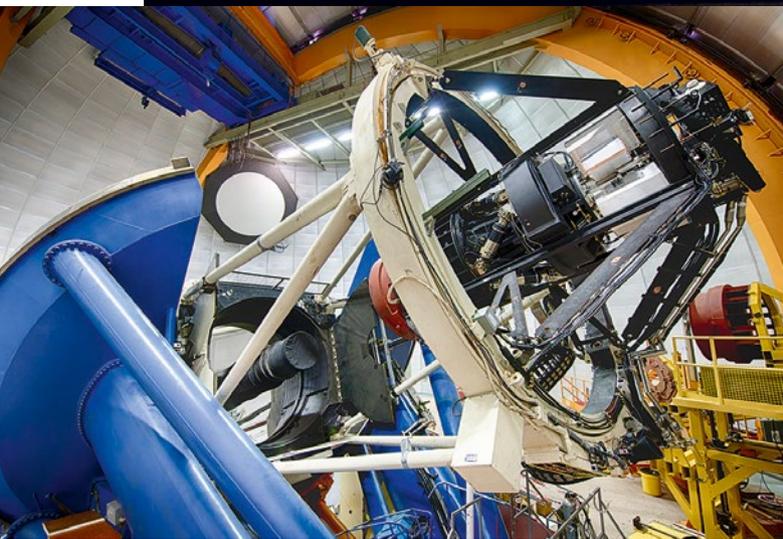
Subir Sarkar jedenfalls glaubt, dass sich seine Kollegen an dieser Stelle in die Tasche lügen. »Die Leute korrigieren die Daten auf Basis unzulässiger Vorannahmen«, sagt er. »Am Ende kommt dann das heraus, was sie gesucht haben.« So gingen Kosmologen standardmäßig davon aus, dass die Eigenbewegung unserer Galaxiengruppe nicht mehr stark ins Gewicht fällt, wenn man Distanzen von mehr als 500 Millionen Lichtjahren betrachtet.

Die Annahme dahinter lässt sich durch eine Analogie aus der Schifffahrt erklären: Dort sind selbst sehr große Wellen vernachlässigbar, wenn man sich für die globalen Ozeanströmungen interessiert. So ähnlich müsse man sich die Materiebewegungen im Weltall vorstellen, argumentieren viele Kosmologen: Aus der Nähe betrachtet mag die Bewegung unserer Milchstraße und ihrer Nachbarn erheblich wirken. Aber wenn man einen hunderte Millionen Lichtjahre großen Bereich überblicke, ist sie vermutlich nur eine von vielen Schwankungen, die sich irgendwann dem »Referenzsystem« der Hintergrundstrahlung angleichen.

Aber ist das wirklich so? Oder reicht der Materiefluss, der unsere Milchstraße bewegt, vielleicht viel weiter ins All hinaus als gedacht? Ordnet er sich möglicherweise gar nicht der Bewegung des Mikrowellenhintergrunds unter? Und noch weitergedacht: Wird das All generell von gewalti-



REIDAR HAHN / FERMILAB / VMS.FNAL.GOV/ASSET/DETAIL/RECID=1614513



REIDAR HAHN / FERMILAB / VMS.FNAL.GOV/ASSET/DETAIL/RECID=1614611

**Das Vier-Meter-Teleskop der Dark Energy Survey behält große Ausschnitte des Nachthimmels über der chilenischen Wüste Atacama im Blick. So können die Forscher Supernovae entdecken.**

Energie auf der Kippe, behaupten die Forscher weiter: Was Kosmologen bisher auf die rätselhafte, allgegenwärtige Antischwerkraft zurückgeführt haben, sei in erster Linie die Beschleunigung unserer eigenen Galaxiengruppe. Sie lasse Supernovae in Gegenrichtung etwas röter erscheinen. Und da man diesen Effekt bei der statistischen Auswertung nicht stark genug berücksichtige, entstehe der Eindruck einer Expansion in alle Richtungen, die es gar nicht gibt.

Sarkar glaubt auch, die Erklärung für den Effekt zu kennen: »Ich vermute, dass wir von irgendeiner großen Masse jenseits des 650 Millionen Lichtjahre entfernten Shapley-Galaxienhaufens angezogen werden.« Dass sich dort eine große Massenansammlung befinden könnte, ein »großer Attraktor«, ist seit Längerem ein Thema unter Astrophysikern. Aber lässt sich damit wirklich die Dunkle Energie aus dem Weltbild der Kosmologie tilgen? Oder haben die Kritiker selbst einen Fehler gemacht und Daten einseitig interpretiert?

### **Außergewöhnliche Behauptungen, aber keine außergewöhnlichen Beweise**

Wer mit anderen Astrophysikern spricht, hört immer wieder letztere Vermutung. Insbesondere US-Wissenschaftler haben mit heftiger Ablehnung auf die These des streitlustigen Professors aus Großbritannien reagiert. »Außergewöhnliche Behauptungen erfordern außergewöhnliche Beweise«, sagt etwa Dragan Huterer von der University of Michigan. »Die sehe ich hier in keiner Weise.«

Huterer und andere Forscher verweisen auf andere Studien, die nach einem vergleichbaren Effekt gesucht haben – und zu dem Schluss kamen, dass das Universum, soweit wir es überblicken, im Großen und Ganzen isotrop zu sein scheint. Auch scheinen die Eigenbewegungen weit entfernter Galaxien keinen nennenswerten Einfluss auf die Auswertungen zu haben. Einige Fachleute finden außer-

gen Strömungen beherrscht, ausgelöst von riesigen Materieansammlungen außerhalb der Sichtweite unserer Teleskope, die allgemein gültige Aussagen sehr schwierig, vielleicht sogar unmöglich machen?

Sarkar ist überzeugt von diesem Szenario: »Der Kosmos scheint nicht isotrop zu sein, wir sind also keine kopernikanischen Beobachter.« Entsprechend seien die bisherigen Bewegungskorrekturen für sehr weit entfernte Supernovae fehlerhaft. Als Beleg führen er und seine drei Kollegen einen öffentlich verfügbaren Datenkatalog ins Feld, der aus 740 Sternexplosionen besteht. Das Team machte bei jeder von ihnen die bereits durchgeführten Rotverschiebungskorrekturen rückgängig. Anschließend habe man überprüft, welches kosmologische Modell mit welchen Korrekturen am besten zu den Daten passt, erläutert Sarkar.

Bei der computergestützten Suche ließ die Gruppe einen Parameter zu, der eine Richtungsabhängigkeit der Rotverschiebung ausdrückt. Wenn weit entfernte Supernovae in einer Himmelsrichtung allesamt etwas röter erscheinen als in Gegenrichtung, sollte der Parameter einen von null verschiedenen Wert annehmen. Laut Sarkar schnitten Modelle mit einer derartigen »Dipol-Komponente« deutlich besser ab als solche, in denen die Rotverschiebung unabhängig von der Blickrichtung ist. Das galt insbesondere dann, wenn der Dipol in die Richtung zeigte, in der sich unsere Galaxiengruppe bewegt. Damit stünde die Dunkle

dem, dass sich die Veröffentlichung von Sarkar selbst widerspricht: In einer Tabelle im Anhang ist aufgelistet, wie gut das konventionelle, dipolfreie Modell die analysierten Supernova-Daten erklärt. »Wenn man das mit dem Modell der Autoren aus einer anderen Tabelle im Paper vergleicht, sieht man, dass dieses sehr viel schlechter zu den Daten passt«, sagt Dragan Huterer.

Sarkar hingegen bestreitet, dass man die Einträge der verschiedenen Tabellen in seinem Fachaufsatz einfach so vergleichen könne – und verweist auf eine andere statistische Sichtweise, der zufolge sein Modell besser abschneide. Aber wieso geht das aus dem Paper dann nicht hervor? Es sei ein Fehler gewesen, das in der Veröffentlichung nicht deutlicher zu machen, rechtfertigt er sich. Geändert hätte das ohnehin wenig: »Dann hätten diejenigen, die unsere Schlussfolgerung nicht mögen, eben einen anderen Knüppel gefunden, um auf uns einzudreschen.« Sarkar dürfte damit unter anderem David Rubin von der University of Hawaii meinen, der einst bei Saul Perlmutter promoviert

hat. Rubin hat gemeinsam mit einer Studentin mehrere Kritikpunkte zusammentragen und ins Internet gestellt. Der US-Amerikaner hat bereits vor drei Jahren die Klagen mit Sarkar gekreuzt, als dieser schon einmal die Auswertung von Supernova-Daten bemängelt hatte. Damals ging es um Korrekturen, die nötig sind, um den Einfluss von interstellarem Staub auf die Rotverschiebung zu berücksichtigen.

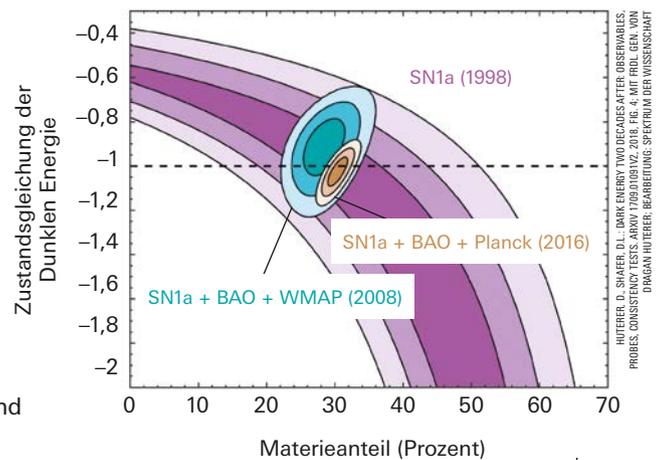
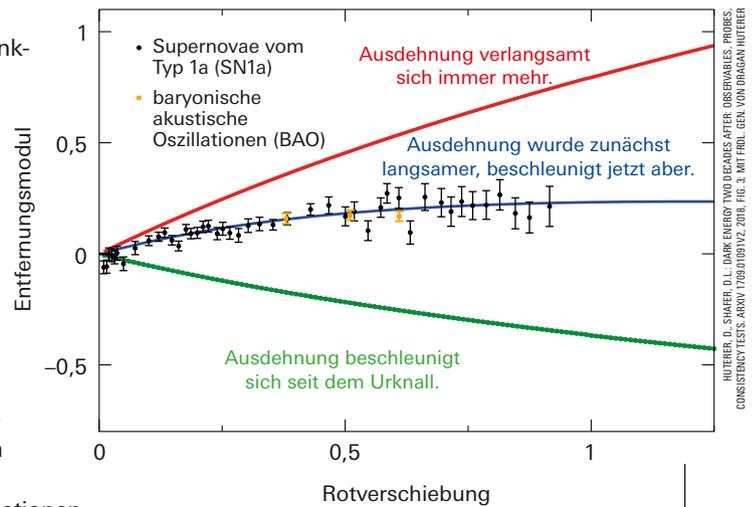
Nun wirft Rubin seinem Kontrahenten unter anderem vor, für seine Neuanalyse keine repräsentative Datenbasis ausgewählt zu haben. Der verwendete Supernova-Katalog, die »Joint Lightcurve Analysis«, stamme aus dem Jahr 2014, obwohl es mittlerweile neuere und größere Datensätze gebe. Wegen solcher Details begegnen viele Astrophysiker Sarkar und seinen Einwänden mittlerweile mit Skepsis: Ihm eilt zuweilen der Ruf voraus, vor allem jene Daten zu betrachten, die sein Argument stützen.

Auch scheint manchem Experten mittlerweile die Lust vergangen zu sein, sich detailliert mit den Ausführungen

## Von den Daten zum Weltmodell

Viele Beobachtungen aus dem All sprechen für die Dunkle Energie. Deutlich wird das, wenn man für verschiedene Supernova-Explosionen Rotverschiebung und das aus der scheinbaren Helligkeit abgeleitete Entfernungsmodul vergleicht (Diagramm rechts oben). Jeder schwarze Punkt steht hier für mehrere zusammengefasste SN1a, die Balken geben jeweils die Unsicherheiten an. Die drei geschwungenen Linien zeigen, welche Daten man für verschiedene Szenarien der kosmischen Vergangenheit erwarten würde. Die Beobachtungen passen demnach am besten zu einem Universum, dessen Ausdehnungsgeschwindigkeit zunächst für ein paar Milliarden Jahre langsamer wurde, seitdem jedoch – angetrieben durch die Dunkle Energie – immer mehr an Fahrt aufnimmt (blaue Linie). Auch die baryonischen akustischen Oszillationen passen gut zu diesem Modell. Gemeint sind großräumige Strukturen im Universum, aus denen sich ableiten lässt, wie stark der Kosmos seit dem Urknall gewachsen ist.

Forscher können auch eingrenzen, wie viel Materie und wie viel Dunkle Energie das Universum enthalten sollte (Diagramm rechts unten). 1998 waren hier noch viele Werte denkbar (lila Schattierungen). 2006 waren es schon etwas weniger (blaue Schattierungen), auch dank des Satelliten WMAP, der die kosmische Hintergrundstrahlung analysierte. Mit den Daten seines Nachfolgers Planck lässt sich die Dunkle Energie heute nochmals besser charakterisieren (beige Schattierungen). Demnach kann der Kosmos nur zu rund 30 Prozent aus Materie bestehen, der Rest muss auf die rätselhafte Energieform entfallen. In Frage kommen auch nur manche Werte der »Zustandsgleichung«: Sie gibt an, in welchem Verhältnis Druck und Dichte der Dunklen Energie stehen. Der Wert hat ein negatives Vorzeichen, man hat man es mit einer abstoßenden Kraft zu tun.



des Oxford-Forschers zu befassen, nachdem seine früheren Angriffe letztlich nie eine überzeugende Lücke ins Weltbild der Kosmologie gerissen haben.

Andere Experten können den Einwürfen des Oxford-Professors dennoch etwas Positives abgewinnen. Da ist zum Beispiel Bruno Leibundgut. Der Schweizer gehörte Ende der 1990er Jahre zu einem der Teams, die die beschleunigte Expansion entdeckt haben, und war später Wissenschaftsdirektor der Europäischen Südsternwarte ESO. Mit Blick auf Sarkars Paper sagt er: »Ich finde, das sind durchaus Fragen, die man stellen kann.« Im Detail überzeugt ihn die These seines Kollegen aber ebenfalls nicht – unter anderem vermisste er eine gründliche Diskussion der Unsicherheiten der Neuanalyse.

Generell müsse man zwei Aussagen der Veröffentlichung unterscheiden, findet Leibundgut: Da sei zum einen die Frage, ob man die Blickrichtung bei der Rotverschiebung stärker berücksichtigen müsse als bisher. »Wir können bisher nicht ausschließen, dass es hier einen Dipol gibt«, sagt er. Die andere Frage sei, ob man daraus folgern könne, dass die Dunkle Energie ein Trugschluss ist. »Das geben die Daten meiner Meinung nach nicht her.«

So ähnlich sieht es auch Dominik J. Schwarz von der Universität Bielefeld: »Ich finde es absolut richtig, die Supernova-Daten nicht zu korrigieren, bevor man ein Modell anpasst, sondern diese Korrekturen als Teil des Modells zu betrachten – und nicht als Teil der Daten«, sagt Schwarz. Letzteres sei bei vielen Kosmologie-Analysen Standard, könne aber im schlimmsten Fall die Ergebnisse verfälschen. Er forsche deshalb zu ähnlichen Fragen.

Der Heidelberger Kosmologe Matthias Bartelmann will die Arbeit ebenfalls nicht rundum verurteilen. »Sie greift den wichtigen Punkt auf, dass es in den Supernova-Daten noch ungeklärte Abhängigkeiten geben mag, die die Signifikanz der daraus abgeleiteten Ergebnisse verringern.« Die daraus gezogene Schlussfolgerung geht ihm aber viel zu

weit: »Allein auf Grund dieses Befundes zu behaupten, es gäbe keine Dunkle Energie, ist angesichts vieler anderer Daten einfach abenteuerlich«, sagt Bartelmann.

Eine berechtigte Frage, aber eine völlig überzogene Schlussfolgerung – so beurteilen Kosmologen auch den Vorstoß der zweiten Gruppe von Astrophysikern, die in den vergangenen Monaten für Schlagzeilen sorgte. Das koreanisch-französische Team um Yijung Kang von der Yonsei University in Seoul beleuchtet darin eine andere Quelle der Unsicherheit bei der Auswertung von Supernova-Daten. Die Sternexplosionen vom Typ 1a könnten demnach bei Weitem keine »Standardkerzen« sein, die immer gleich viel Strahlung freisetzen, sondern je nach Alter des Vorgängersterns unterschiedlich heftig explodieren.

### 27 von 1000 Supernovae – das ist ein zu kleiner Datensatz für eine Revolution

Auch diesem Einwand tragen die Supernova-Analysen seit Langem Rechnung, indem sie eine entsprechende Sicherheitsmarge enthalten. Kang und Kollegen halten das Vorgehen jedoch für unzureichend: Im frühen Universum, als Sterne noch jünger waren, könnten sie weniger hell explodiert sein, da sie damals eine andere chemische Zusammensetzung hatten, behauptet das Team. Dadurch würde man die vom Licht zurückgelegte Entfernung systematisch überschätzen – und fälschlicherweise auf ein Universum schließen, das sich immer schneller ausgedehnt hat.

Die Forscher wollen Hinweise auf einen entsprechenden Trend in einem Datensatz aus 27 Supernovae aufgespürt haben. Aber auch sie ernten für ihre methodische Auswertung viel Kritik: Von einem Paper mit solch einer gewagten Hypothese würde man eine größere Datenbasis erwarten, sagt Dillon Brout von University of Pennsylvania. »Wenn man von den mehr als 1000 verfügbaren Supernovae nur 27 für seine Analyse nutzt, besteht die große Gefahr, eine verzerrte Stichprobe auszuwählen.«

Brout bemängelt außerdem, dass die Autoren die statistischen Unsicherheiten ihrer Analyse offenkundig stark unterschätzen. Nur so seien sie in der Lage, ihre Aufsehen erregende These aufrechtzuerhalten. »Einen so großen Effekt hätte man bereits in anderen Datensätzen und Analysen entdecken müssen«, sagt Brout. Da man dies nicht getan habe, stehe die Kritik auf sehr wackeligen Beinen. Das unterstreicht auch das Paper eines Teams um Nobelpreisträger Adam Riess aus dem März 2020: Die Forscher wiederholten die strittige Auswertung für einen größeren Supernova-Datensatz – und fanden keinen entsprechenden Effekt.

Dass Arbeiten wie die von Kang oder Sarkar dennoch so viel mediale Aufmerksamkeit bekommen, ärgert Kosmologen. »Ich finde diese Das-Haus-steht-in-Flammen-Rhetorik zunehmend ermüdend«, schrieb etwa die Astrophysikerin Renée Hložek von der University of Toronto jüngst auf Twitter. Und ihr Kollege Graeme Addison von der Johns Hopkins University ergänzte: Bei den strittigen Veröffentlichungen habe offenbar das Peer-Review durch unabhängige Gutachter nicht richtig funktioniert. »Es ist sehr frustrierend, solche Paper in angesehenen Fachzeitschriften zu sehen.«

Tatsächlich wird die Dunkle Energie mittlerweile von einem ganzen Studienkanon gestützt. Supernovae mögen



Die Galaxie NGC 1015 ist 119 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt. 2009 leuchtete rechts oberhalb des Zentrums eine Supernova auf (Pfeil).

## Kosmologische Konstante oder Quintessenz

Der Name ist bisher in erster Linie ein Platzhalter – was sich hinter der Dunklen Energie verbirgt, ist unbekannt. Ist es ein unsichtbares Energiefeld, das den ganzen Kosmos füllt? Oder doch eher eine inhärente Eigenschaft der Raumzeit? Aktuell debattieren Kosmologen eher darüber, ob sich die Dichte der Dunklen Energie mit der Zeit verändert. Bisher gehen die meisten Fachleute davon aus, dass dies nicht der Fall ist. Die Dunkle Energie entspräche damit der »kosmologischen Konstante«, die bereits Albert Einstein (vorübergehend) in die Feldgleichungen seiner Relativitätstheorie aufnahm. Jeder Kubikmeter Weltraum würde in diesem Fall stets gleich viel Dunkle Energie enthalten, die kosmische Expansion würde sich damit immer weiter beschleunigen.

Doch nicht alle Messungen passen zu diesem Szenario. So gibt es derzeit Streit um die gegenwärtige Expansionsrate des Alls, die so genannte Hubble-Konstante. Er ließe sich auflösen, wenn das All früher mit einer anderen Beschleunigung expandiert wäre als heute. In diesem Fall hätte sich die Dichte der Dunklen Energie mit der Zeit verändert. Ein populäres Modell dafür ist die so genannte Quintessenz. Demnach könnte das All in Zukunft auch wieder langsamer werden. Wie die Dunkle Energie wirklich beschaffen ist, sollen mehrere Projekte in den kommenden Jahren zeigen, etwa das ESA-Teleskop EUCLID oder das US-amerikanische Vera Rubin Observatory.

dabei die wichtigste Säule sein, aber sie sind nicht die einzige (siehe »Vier Schlüssel zur kosmischen Expansion«, S. 16/17). Hinweise liefert auch die kosmische Hintergrundstrahlung, aus der Forscher die Materieverteilung 380000 Jahre nach dem Urknall folgern können. Indirekt lässt sich aus dem Babybild des Kosmos folgern, dass er große Mengen einer unbekannteren Energieform enthalten muss.

Die großräumige Verteilung der Materie im heutigen Universum ist ein weiterer Pfeiler: Die kosmischen Strukturen sehen so aus, als handele es sich um die aus der Hintergrundstrahlung ersichtlichen Dichteschwankungen, die in den letzten 13,8 Milliarden Jahren stark vergrößert wurden – mit just einer Geschwindigkeit, wie man sie von einem von Dunkler Energie dominierten Universum erwarten würde. Auch die aus »Gravitationslinsen« gewonnenen Daten sind ein Indiz für die Dunkle Energie. Gemeint sind große Masseansammlungen wie Galaxienhaufen, die laut Albert Einsteins Relativitätstheorie Dellen in die Raumzeit machen. Licht macht daher einen Bogen, wenn es eine solche Region durchquert. Auf Teleskopaufnahmen erschei-

nen helle Strahlungsquellen, die sich hinter einem Galaxienhaufen verbergen, daher oft leicht verzerrt. Aus dem Grad der Verzerrung lässt sich ermitteln, wie viel Materie sich im Umfeld des Galaxienhaufens befindet. Und da verschiedene Gravitationslinsen jeweils unterschiedliche Zeitpunkte während der kosmischen Evolution widerspiegeln, können Forscher rekonstruieren, wie sich die Masse im Lauf der Zeit verteilt hat.

Einen ähnlichen Lackmuestest ermöglicht eine Auswertung der Abstände zwischen Galaxien am Firmament bei unterschiedlichen Rotverschiebungen. Damit lässt sich ebenfalls eingrenzen, wie stark sich das All im Lauf der Zeit ausgedehnt hat. Beide Techniken haben rund 400 Wissenschaftler in den vergangenen Jahren genutzt, um den Einfluss der Dunklen Energie in der jüngeren kosmischen Vergangenheit abzuschätzen; als Datenbasis dienten 650000 Galaxien. Die Ergebnisse dieser der Dark Energy Survey (DES) sprechen stark für ein Universum, das immer schneller expandiert, wie die Forscher 2018 berichteten. Daneben gibt es mittlerweile Analysen, die alle Indizien kombinieren und Supernova-Explosionen bewusst ausklammern. Ihnen zufolge ist ein Universum, in dem es keine Dunkle Energie gibt, extrem unplausibel.

Querdenker wie Subir Sarkar werden wohl in all diesen Arbeiten Stellen finden, an denen sich Fehler verbergen könnten. Man müsse alle Indizien für die Dunkle Energie einzeln und außerhalb des gegenwärtigen kosmologischen Weltmodells betrachten, sagt er. Dem würden wohl die wenigsten Experten widersprechen. Dass die Fehlersuche am Ende auf ein Universum ohne Dunkle Energie hinausläuft, halten die allermeisten von ihnen jedoch für sehr unwahrscheinlich.

Dennoch könnte die Debatte dabei helfen, die Werkzeuge der Kosmologie zu schärfen. Vielleicht lässt sich so ein seit Jahren tobender Streit über die heutige Expansionsrate des Weltalls, die so genannte Hubble-Konstante, beenden (siehe »Spektrum« Juli 2018, S. 12). Bei ihm spielen Supernovae von Typ Ia ebenfalls eine Schlüsselrolle. Und am Ende sind sie womöglich doch etwas weniger zuverlässig als gedacht.

So ähnlich scheint es Jim Peebles zu sehen. Zwar hat der frisch gebackene Nobelpreisträger bis heute nicht Subir Sarkars E-Mail reagiert. Aber in seinem Stockholmer Festvortrag nahm er indirekt Bezug auf die Dunkle Energie – wenn auch wohl anders, als Sarkar sich erhofft haben dürfte: »Sie ist real und wir brauchen sie«, sagte Peebles kurz und knapp. »Wir wissen allerdings immer noch nicht, was sich dahinter verbirgt.« ◀

### QUELLEN

**Colin, J. et al.:** Evidence for anisotropy in cosmic acceleration. *Astronomy & Astrophysics* 631, 2019

**Huterer, D., Shafer, D.L.:** Dark energy two decades after: Observables, probes, consistency tests. *Reports on Progress in Physics* 81, 2017

**Kang, Y. et al.:** Early-type host galaxies of type Ia supernovae. II. evidence for luminosity evolution in supernova cosmology. *The Astrophysical Journal* 889, 2020

## PHYSIK WENN WASSERSTOFF ZU METALL ERSTARRT

Aus dem leichtesten aller chemischen Element könnte der beste elektrische Leiter überhaupt werden. Nun sind Physiker dieser Vision ein wichtiges Stück näher gekommen.

► Auf den ersten Blick scheint Wasserstoff geradezu langweilig: Ein Proton, ein Elektron – das war's. Hinter der Einfachheit verbirgt sich jedoch beispiellose Vielfalt. Die Nummer eins im Periodensystem der Elemente bildet Sterne, interstellare Gaswolken und Riesenplaneten. Seine Atome stecken in fast allen wichtigen chemischen Verbindungen, von Wasser bis hin zu DNA.

Doch seinen vielleicht größten Trick hat Wasserstoff bisher nur auf dem Papier vollbracht. Drückt man ein Gas aus  $H_2$ -Molekülen stark genug zusammen, ordnen sich die Atome früher oder später in einem starren 3-D-Gitter an und bilden dadurch einen festen Körper. Durch diesen könnten sich Elektronen ungestört bewegen. Aus dem unscheinbaren Gas wäre damit ein elektrischer Leiter geworden.

So besagt es zumindest eine theoretische Arbeit aus dem Jahr 1935. Doch kann Wasserstoff auch in der Realität zum Metall werden? Forscher halten die Frage für eines der wichtigsten Ziele der Festkörperphysik, für die Antwort könnte es vielleicht sogar einen Nobelpreis geben.

Kein Wunder: Berechnungen zufolge würde metallischer Wasserstoff Strom völlig verlustfrei übertragen, Physiker sprechen von Supraleitung. Eventuell könnte dies sogar bei Plusgraden gelten, also weit oberhalb der bisherigen Temperaturgrenze für die Supraleitung. Manche Wissenschaftler halten es darüber hinaus für denkbar, dass ein Metall aus purem Wasserstoff seine Form behält, wenn man die Atome einmal in die kompakte Anordnung gebracht hat.

Finden Forscher also eine technische Möglichkeit, das Allerwelts-element stark genug zusammenzudrücken, erschaffen sie damit also womöglich ein wahrhaft außergewöhnliches Material. Da überrascht es

wenig, dass mehrere Teams seit Jahren mit großem Eifer auf das prestigeträchtige Ziel hinarbeiten. Mehr als einmal verkündeten sie dabei einen Durchbruch, so etwa 2012 und 2017. Doch bis heute hat keine dieser Behauptungen die Überprüfung von Fachkollegen überstanden, im Gegenteil: Die sehr kompetitive Forscher-szene steht seit Längerem im Ruf, extrem kritisch mit den Ergebnissen konkurrierender Teams umzugehen.

Der Messung eines Trios um Paul Loubeyre vom französischen Kernforschungszentrum CEA könnte es anders ergehen. Die Gruppe zählt zu den führenden Teams auf dem Gebiet – und präsentiert nun neue Indizien für den heiß gesuchten Phasenzustand des Wasserstoffs. Nach Ansicht unbeteiligter Experten sind die Daten deutlich überzeugender als die aus früheren Arbeiten, auch wenn sie noch nicht ganz ausreichen, um die Entdeckung metallischen Wasserstoffs zu verkünden.

### Selbst Diamant zersplittert bei den Experimenten

Um das Gas in ein Metall zu verwandeln, ist großer technischer Aufwand nötig. Berechnungen zufolge muss man Wasserstoff dazu mit hunderten Gigapascal zusammendrücken. Das entspricht dem Millionenfachen des auf der Erdoberfläche üblichen Luftdrucks und übersteigt sogar den Druck im Erdkern.

Einzig Diamantpressen können ein Material so stark komprimieren. Sie klemmen Proben zwischen zwei Stempeln ein und drücken diese anschließend mit mechanischer Kraft zusammen. Doch selbst Diamant stößt dabei an seine Grenze: Oft zersplittert das ultraharte Material bei den Messungen. Paul Loubeyre und seine beiden Kollegen haben die Technik daher verfeinert. Mit Hilfe eines Atom-

strahls frästen sie die Oberfläche der beiden Stempelköpfe so ab, dass jeweils ein abgeflachter Höcker hervorragt. Dadurch verteilt sich die mechanische Spannung besser, und eine wenige Mikrometer große Probe lässt sich stärker zusammendrücken als bisher, ohne dass der Diamant zerspringt.

Daneben haben die Forscher einen neuen Weg ausgetüfelt, um das Geschehen zwischen den Stempeln zu beobachten. In früheren Versuchen setzte man hierzu auf Laser, die sichtbares Licht aussenden. Das Kalkül dahinter: Als Gas und Flüssigkeit ist Wasserstoff durchsichtig. Sobald er jedoch fest wird, lässt er keine Strahlung mehr durch. Kann Licht bei einem bestimmten Druck die Probe nicht mehr durchdringen, ist der Wasserstoff also zu einem Festkörper erstarrt.

Nun ist fester Wasserstoff allerdings noch nicht gleichbedeutend mit metallischem Wasserstoff. Schon länger ist bekannt, dass das Element mehrere feste Formen annehmen kann, die keinerlei Strom leiten. Den einfachsten dieser Zustände erhält man, wenn man Wasserstoff bei Atmosphärendruck auf minus 259 Grad Celsius abkühlt. Ein Metall sollte sich dagegen erst bilden, wenn der äußere Druck 400 Gigapascal deutlich übersteigt.

Bei so hohen Drücken versagt Licht als Analysewerkzeug: Oberhalb von 310 Gigapascal kann es nicht mehr in die Probe eindringen, da die dicht

**Das ultimative Ziel ist ein fester Körper, der nur aus Wasserstoff besteht**

gepackten Moleküle dann Strahlung dieser Wellenlängen abfangen. Auf Bildern erscheint die Probe dadurch als schwarzer Fleck. Folglich weiß man nicht mehr, was bei höheren Drücken im Inneren passiert.

Loubeyre und seine Kollegen nutzten daher das Infrarotlicht eines Synchrotron-Teilchenbeschleunigers bei Paris für ihre Tests. Diese Strahlung kann auch jenseits von 310 Gigapascal noch in festen Wasserstoff eindringen – nicht jedoch in ein Metall. Und siehe da: Bis zu einem Druck von 425 Gigapascal blieb die stark abgekühlte Probe transparent, dann machte sie dicht. Das lasse sich am besten damit erklären, dass das Gitter aus Wasserstoffmolekülen leitend wird: Die Elektronen seien nur noch lose an einzelne Gitterplätze gebunden und könnten leicht zu Nachbarn springen, wobei sie Infrarotstrahlung abfangen.

Laut den Simulationen der Forscher ist es von hier nur noch ein kurzer Weg zu echtem metallischem Wasserstoff: Ab 447 Gigapascal müssten die Moleküle sich in Atome auflösen, es entstünde ein perfekt symmetrisches Gitter. Elektronen wären darin nicht mehr an Atomkerne gebunden und könnten sich leicht durch das Material bewegen – und dieses in einen phänomenalen Leiter verwandeln.

### Die vielen Gesichter des Wasserstoffs

Damit mögen Loubeyre und seine Kollegen noch nicht ganz am Ziel sein. Die Messung gilt aber als wichtiger Fortschritt. Serge Desgreniers von der University of Ottawa spricht in einem von »Nature« veröffentlichten Begleit-Kommentar etwa von einem »beinahe endgültigen« Beweis für die Existenz des besonderen Materials. Etwas zurückhaltender ist Graeme

**Die Stempel von Diamantpressen bestehen aus synthetischem Material. Mit ihnen lassen sich Proben extrem stark zusammendrücken.**

Ackland von der University of Edinburgh. »Ich denke, wir werden von nun an immer überzeugendere Veröffentlichungen sehen, an deren Ende die ›Entdeckung‹ von metallischem Wasserstoff steht«, sagt er. Ackland lobt unter anderem, dass seine französischen Kollegen einen wichtigen Test durchgeführt haben: Zeitweise senkten sie den auf die Probe ausgeübten Druck etwas, woraufhin der Wasserstoff wieder transparent wurde.

Insbesondere bei einer viel diskutierten Arbeit aus dem Jahr 2017 habe dieser Schritt gefehlt. Damals gaben Ranga Dias und Isaac Silvera von der Harvard University vor, Wasserstoff mit spektakulären 495 Gigapascal komprimiert zu haben. Dabei habe sich die Probe wie ein Metall verhalten, berichteten die Forscher. Damit sorgten sie weltweit für Schlagzeilen, auch dank geschickter Pressearbeit. Das Duo musste jedoch im Nachgang viel Kritik einstecken und den Fachaufsatz an einigen Stellen korrigieren.

Ob der jetzt erschienenen Veröffentlichung von Loubeyre und seinen Mitstreitern solch ein Schicksal erspart bleiben wird? »Ich halte das Ergebnis für deutlich überzeugender als das 2017er Paper von Dias und Silvera«,

findet Alexander Goncharov von der Carnegie Institution for Science. Gänzlich überzeugt ist er jedoch ebenfalls nicht: Er vermisst weitere Messungen, aus denen klar hervorgeht, dass sich das stark zusammengedrückte Material wirklich wie ein Metall verhalte. So erwarte man unter anderem, dass die Probe Strahlung nicht nur absorbiere, sondern auch reflektiere, was die bisherigen Daten nicht hergäben.

Das ist nicht der einzige Test, der aus Sicht von Experten noch aussteht. Ein anderer betrifft die tatsächliche elektrische Leitfähigkeit der Probe, die nochmals schwerer zu messen ist. Diese Untersuchung sei aber nötig, um von einer Entdeckung zu reden, sagt Mikhail Eremets vom Mainzer Max-Planck-Institut für Chemie.

Er und sein Team haben Messungen zur Leitfähigkeit bereits 2019 veröffentlicht, kamen damals mit ihrer Diamantpresse jedoch nur bis zu einem Druck von 360 Gigapascal. Dabei bildete sich ein Gitter aus  $H_2$ -Molekülen, das Strom immerhin schon so gut wie ein Halbmetall leitete. Letztlich könnte Wasserstoff bei den richtigen Bedingungen bereits in der molekularen Form zu einem

THOMAS HARTMANN FÜR IMPE

vollwertigen Metall und sogar einem Supraleiter werden, sagt Eremets.

Er und sein Team führen auch Experimente mit so genannten Lanthaniden durch: Sie bestehen hauptsächlich aus H-Atomen, die sich in Zehnergruppen um ein schweres Lanthan-Atom anordnen. Es bindet sein Umfeld stark an sich. Das könnte den Druck senken, den man von außen aufbringen muss, um ein wasserstofflastiges Gitter supraleitend zu machen (siehe Spektrum Januar 2020, S. 12).

Das ultimative Ziel der meisten Fachleute dürfte aber wohl jenes reine Metall aus einzelnen H-Atomen sein,

das Loubeyre und sein Team bei Drücken von 447 Gigapascal erwarten. Es ist wahrscheinlich, dass Forscher in naher Zukunft diesen Meilenstein erreichen. Ob die Messung dann auf Anhieb alle Konkurrenten überzeugen wird, ist jedoch fraglich. Silvera und Dias, die Stars des Jahres 2017, halten zum Beispiel wenig von den nun veröffentlichten Ergebnissen der französischen Gruppe um Paul Loubeyre.

Dieser gibt sich auf Nachfrage dagegen eher bescheiden: Nein, ein Nachweis für metallischen Wasserstoff sei seine Messung noch nicht, sondern lediglich ein starkes Indiz.

»Andere Gruppen, die Experten für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit sind, werden nun mit Diamantpressen unseres Designs sicherlich weitere Tests durchführen.«

**Robert Gast** ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

## QUELLEN

**Eremets, M. I. et al.:** Semimetallic molecular hydrogen at pressure above 350 GPa. *Nature Physics* 15, 2019

**Loubeyre, P. et al.:** Synchrotron infrared spectroscopic evidence of the probable transition to metal hydrogen. *Nature* 577, 2020

## BIOPHYSIK GEGEN DEN STROM

**Bakterien können sich in Flüssigkeiten gegen die Stromrichtung bewegen. Dabei zeigen sie seltsame Bewegungsmuster, die Forscher nun erstmals theoretisch analysiert haben. Die Erkenntnisse könnten helfen, die Kontamination medizinischer Geräte zu vermeiden.**

Wenn Bakterien sich in medizinischen Geräten ansiedeln, ist das eine ernste gesundheitliche Bedrohung. Dass die Mikroben unter bestimmten Bedingungen in wasserdurchströmten Kanälen stromaufwärts schwimmen können, beunruhigt da umso mehr. Das kann beispielsweise Katheter kontaminieren, die in den Körper eines Patienten eingeführt wurden. Physiker um Anke Lindner von der Universität Paris Diderot haben nun erstmals praktisch untersucht und theoretisch beschrieben, wie sich Bakterien der Spezies *Escherichia coli* an der Strömung des umgebenden Mediums orientieren. Bisher hatten Fachleute nur unzureichend verstanden, wie diese »Rheotaxis« funktioniert (»rheo«: griechisch für »das Fließen«, »taxis«: griechisch für »Ausrichtung«), denn Mikroben haben komplexe Bewegungsapparate entwickelt, die auf verschiedenste Weise mit der Umgebung wechselwirken. Das Team um Lindner förderte dazu Überraschendes zu Tage.

Bakterien nehmen das wässrige Medium, in dem sie sich bewegen, als sehr zähflüssig wahr – etwa so, als

würden wir in Honig schwimmen. Die Trägheitskräfte hingegen sind unter diesen Bedingungen vernachlässigbar. Um in diesem Milieu voranzukommen, nutzen Mikroben wie *E. coli* ein Bündel aus langen Fasern, die wie Korkenzieher geformt sind – so genannte Flagellen. Diese sitzen an einem Ende des ovalen Zellkörpers und rotieren mit Hilfe von Motorproteinen. Bei einer Vorwärtsbewegung des Bakteriums drehen sich die Flagellen zunächst gegen den Uhrzeigersinn. Während der daraus resultierende Schub die Zelle antreibt, wickeln sich die Flagellen umeinander. Schert jedoch eines von ihnen aus, taumelt die Mikrobe und ändert ihre Orientierung. Je nachdem, wann sie dieses Torkeln zulässt, kann sie ihren Kurs beeinflussen. Nimmt zum Beispiel die Konzentration von Nährstoffen zu, registriert das Bakterium dies durch seine Biosensoren und bewegt sich weiterhin geradeaus; sinkt die Konzentration, leitet es eine Taumelbewegung ein und schwimmt infolgedessen nicht weiter in Richtung Nahrungsmangel.

Die Forscher um Lindner haben für ihre Experimente eine Variante von

*E. coli* genutzt, die fast nie eine Taumelbewegung vollführt. Diese Mikrobenart bewegt sich infolge der Antriebskraft der Flagellen praktisch immer vorwärts. Genau wie andere Bakterienstämme sammelt sie sich jedoch in Röhren und Kanülen bevorzugt auf der (inneren) Oberfläche. Wird das Röhren nun durchströmt, beginnen sich die Bakterien in seltsam anmutenden Mustern zu bewegen. Um das im Detail zu untersuchen, setzten Lindner und ihre Kollegen die Einzeller in einen durchströmten Mikrokanal, in dem ein laminares Strömungsprofil herrschte – also eines, in dem quasi die verschiedenen Flüssigkeitsschichten ohne turbulente Verwirbelungen parallel aneinander entlanglitten.

### **Je näher an der Mitte, umso stärker die Strömung**

In diesem laminaren Profil ruht die Flüssigkeitsschicht, die der Kanalwand direkt anhaftet, während zur Mitte des Kanals hin die Strömungsgeschwindigkeit zunimmt. Die so genannte Schergeschwindigkeit ist dabei ein Maß für den Geschwindigkeitsanstieg von der Wand zur Mitte des Kanals: Je stärker

## In günstiger Umgebung ist die Kreisbewegung von Vorteil

er durchströmt wird, desto höher die Fließgeschwindigkeit im Zentrum und umso höher auch die Schergeschwindigkeit. Das Forscherteam untersuchte, wie sich die Bakterien mit steigender Schergeschwindigkeit im Kanal orientieren und fortbewegen. Hierzu markierten sie die Mikroben mit Fluoreszenzfarbstoffen und beobachteten sie mit einem Mikroskop.

Bei kleinen Schergeschwindigkeiten beziehungsweise dem völligen Fehlen einer Strömung schwammen die Kolibakterien dicht an der Kanalwand entlang im Kreis. Überstieg die Schergeschwindigkeit einen gewissen Betrag, begannen sie sich stromaufwärts zu bewegen. Bei noch stärkerer Durchströmung änderten sie ihr Verhalten abermals und drifteten in einer Spiralbahn stromabwärts, wobei sie einen Drall nach rechts aufwiesen. Bei weiter wachsender Strömungs- und somit Schergeschwindigkeit legten sie ab einem gewissen Punkt ein viertes Verhalten an den Tag, nämlich eine Spiralbahn stromabwärts mit einem gelegentlichen Drall nach links oder einem Wechsel zwischen rechts- und linksseitigem Drall. Die

Bakterien schalten aber nicht aktiv zwischen diesen Bewegungsmodi um und registrieren die Änderung der Schergeschwindigkeit auch nicht etwa über Rezeptoren. Die Ursachen für das wechselnde Schwimmverhalten sind laut dem Forscherteam rein physikalischer Natur und lassen sich mit Hilfe von Computersimulationen nachvollziehen.

Demnach kreisen die Mikroben bei kleinen Schergeschwindigkeiten, weil ihr Zellkörper, der wesentlich größer ist als die Flagellen, durch Adhäsionskräfte immer wieder an der Rohrwand »klebt«. Zusammen mit dem Schub der rotierenden Flagellen führt das zu einem Drehmoment, das die Bakterien dazu zwingt, sich nahe der Kanalwand gegen den Uhrzeigersinn zu drehen. Wächst die Schergeschwindigkeit, beginnen die Flagellen irgendwann wie Wetterfahnen im Flüssigkeitsstrom »zu wehen«, während der Zellkörper immer noch dazu neigt, an der Wand zu haften. Der Schub der Flagellen drückt das Bakterium nun stromaufwärts. Diesen »Wetterfahnen-Effekt« hat ein Forscherteam um Chih-kuan Tung an der Cornell University bereits im Jahr 2015 beschrieben – allerdings für Spermienzellen.

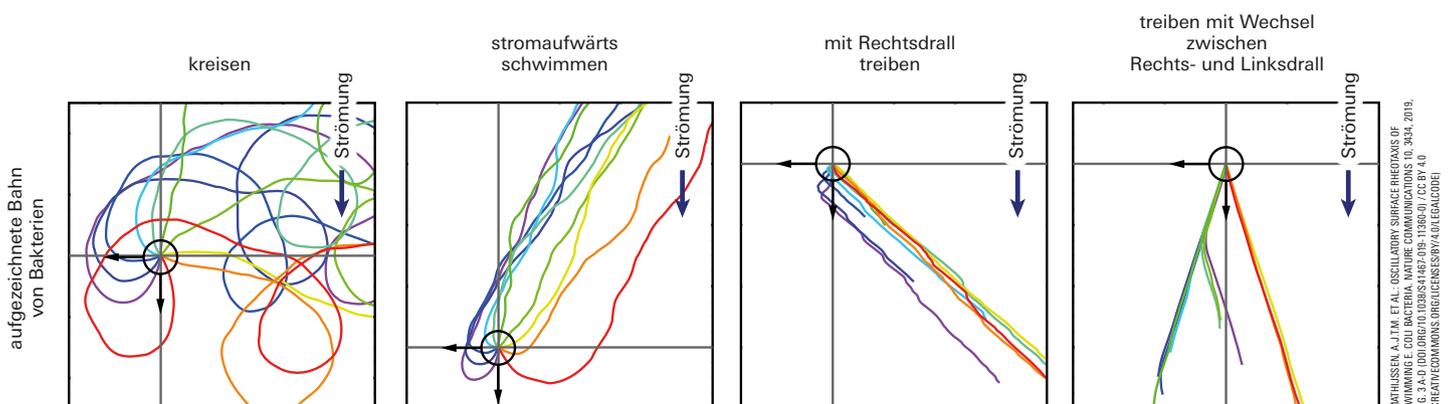
Aus biologischer Sicht könnten diese physikalischen Effekte den evolutionären Erfolg der Mikroben gefördert, aber auch die Befruchtung

mittels Spermienzellen unterstützt haben. Denn die Kreisbewegung ist von Vorteil, wenn die Einzeller sich in einer für sie günstigen Umgebung befinden – sei es oberhalb nährstoffreicher Oberflächen in ruhenden Flüssigkeiten oder in unmittelbarer Nähe einer Eizelle. Strömenden Flüssigkeiten hingegen sind Bakterien beispielsweise dann ausgesetzt, wenn sie einen Organismus befallen und dabei in dessen Kreislaufsystem eindringen. Die zweite Stufe der Rheotaxis, das Schwimmen stromaufwärts, könnte ihnen dann helfen, die Verteidigung des Wirts zu überwinden. Laut Tung könnten sich zudem die Schwimmbewegungen von Spermien und die Strömungen im weiblichen Genitaltrakt evolutionär einander angepasst haben, so dass die Spermien erfolgreich zur Eizelle vordringen können.

### Vom Getriebenwerden ins Torkeln

Bei noch größeren Schergeschwindigkeiten beginnt der Mikroschwimmer aber mit der Flüssigkeit zu treiben. Die Haftung zwischen Zellkörper und Kanalwand sowie der Vortrieb der rotierenden Flagellen treten nun gegenüber den einwirkenden Strömungskräften in den Hintergrund, und der Zellkörper orientiert sich stromabwärts. Seine ovale Form führt zusammen mit dem »Flattern« der Flagellen dazu, dass das Bakterium eine periodische

**Mit steigender Schergeschwindigkeit des umgebenden Mediums kreisen Bakterien zunächst, dann schwimmen sie stromaufwärts, dann treiben sie mit Rechtsdrall in der Strömung – und schließlich torkeln sie, in der Flüssigkeit treibend, zwischen Rechts- und Linksdrall hin und her (Bildfolge von links nach rechts).**



MATHIJSSEN, A.J.T.M. ET AL. / OSCILLATORY SURFACE RHEOTAXIS OF SWIMMING E. COLI BACTERIA. NATURE COMMUNICATIONS 10, 3434, 2019. FIG. 3 A-D (DOI:10.1038/S41467-019-11360-0) / CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS.ORG/LICENCES/BY/4.0/LEGALCODE)

Bewegung ausführt, die sich in einer Spiralbahn äußert. Deren Drall nach rechts lässt sich mit der asymmetrischen Form der Flagellen erklären. Steigt die Schergeschwindigkeit weiter, dann wachsen auch die einwirkenden Strömungskräfte und der Flagellenschub spielt eine immer geringere Rolle, weshalb die Einzeller irgendwann beginnen, vom Rechts- in den Linksdrall zu »torkeln« und umgekehrt.

Die Physiker um Lindner haben nun sämtliche Bewegungsmodi der Mikroben beschrieben, indem sie die Bewegungsgleichungen für alle möglichen Orientierungswinkel der Einzeller im Verhältnis zur Strömung lösten. Die zweite kritische Schergeschwindigkeit konnten sie direkt aus den Bewegungsgleichungen berechnen, den dritten und vierten Grenzwert haben sie in ihren Computersimulationen näherungsweise bestimmt. Ihre Erkenntnisse könnten helfen, die Kontamination medizinischer Geräte mit Bakterien zu verringern.

Beispielsweise liegt die typische Schergeschwindigkeit in einem Urinkatheter in einem Bereich, in dem sich *E. coli*-Bakterien stromaufwärts bewegen. Das ließe sich etwa vermeiden, indem die Strömungs- und damit die Schergeschwindigkeit erhöht wird. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Katheterwand im Nanometermaßstab so zu strukturieren, dass deren Kontaktfläche zu den Zellkörpern von *E. coli* möglichst klein wird. Dann könnten die Bakterien kaum noch an der Wand haften, was ihnen das Stromaufwärtsschwimmen unmöglich machen würde.

**Stefan-Johannes Reich** ist Physiker und Wissenschaftsjournalist in Düsseldorf.

## QUELLEN

**Mathijssen, A. et al.:** Oscillatory surface rheotaxis of swimming *E. coli* Bacteria. *Nature Communications* 10, 2019

**Spengler, C. et al.:** Strength of bacterial adhesion on nanostructured surfaces quantified by substrate morphometry. *Nanoscale* 42, 2019

**Tung, C. et al.:** Emergence of upstream swimming through a hydrodynamic transition. *Physical Review Letters* 114, 2015

## MATHEMATIK REVOLUTION IN DER LINEAREN ALGEBRA

**Eigentlich wollten drei Physiker nur untersuchen, wie sich Neutrinos in Materie verhalten. Doch dann stießen sie auf eine bisher unbekannte Verbindung zwischen allgegenwärtigen mathematischen Objekten, die niemand erwartet hatte.**

► An einem Morgen im August 2019 empfing der renommierte Mathematiker Terence Tao eine E-Mail von drei Physikern, die er nicht kannte. Darin erklärten sie, sie seien über eine einfache Formel gestolpert, die – falls sie richtig ist – eine unerwartete Beziehung zwischen den grundlegendsten Objekten der linearen Algebra herstellt.

»Die Formel sah zu gut aus, um wahr zu sein«, sagt Tao, Professor an der University of California in Los Angeles sowie Träger der begehrten Fields-Medaille. »Etwas so Prägnantes und Einfaches. Es hätte schon längst in den Lehrbüchern stehen sollen«, fügt er hinzu. »Daher war mein erster Gedanke, dass die Arbeit einen Fehler enthalten musste.« Doch als er genauer über das Problem nachdachte, konnte er keinen solchen finden. Die Physiker schienen mit ihrer Formel richtigzuliegen.

Die drei Forscher, Stephen Parke vom Fermi National Accelerator Laboratory, Xining Zhang von der University of Chicago und Peter Denton vom Brookhaven National Laboratory, hatten den mathematischen Zusammenhang etwa zwei Monate zuvor bemerkt, als sie sich mit Neutrinos beschäftigten, jenen geisterhaften Elementarteilchen, die im Universum allgegenwärtig sind. Dabei fiel ihnen auf, dass sich die schwer zu berechnenden Eigenvektoren, die beschreiben, wie sich Neutrinos in Materie ausbreiten, aus den deutlich einfacher zu bestimmenden Eigenwerten ergeben. Die Physiker vermuteten, dass diese Beziehung auch über ihren Spezialfall hinaus gilt.

Das war eine große Überraschung, schließlich widmen sich Mathemati-

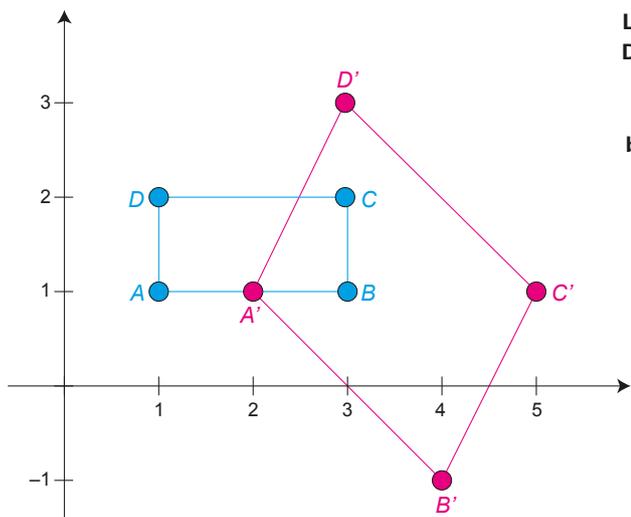
ker, Physiker und Ingenieure seit dem 18. Jahrhundert den allgegenwärtigen Eigenvektoren und Eigenwerten. Um auszuschließen, dass sie einen längst bekannten Zusammenhang entdeckt hatten, durchsuchten die drei Forscher etliche Fachbücher nach einer solchen Formel – vergebens.

Sie entschieden sich daher, Tao zu kontaktieren, trotz eines Hinweises auf seiner Website, der von solchen Anfragen abriet. »Knapp zwei Stunden später erhielten wir eine Antwort, in der Tao sagte, er habe eine solche Verbindung noch nie zuvor gesehen«, erinnert sich Parke. Zudem enthielt die E-Mail des berühmten Mathematikers drei unabhängige Beweise der neuen mathematischen Identität.

### Überraschung für Mathematiker

Danach ging alles sehr schnell. Nach eineinhalb Wochen veröffentlichten die drei Physiker zusammen mit Tao ihr Ergebnis online auf dem Preprint-Server ArXiv. Derzeit prüft das Fachjournal »Communications in Mathematical Physics« ihre Arbeit. In einem separaten Aufsatz, das dem »Journal of High Energy Physics« vorliegt, nutzten Denton, Parke und Zhang ihre Formel, um die Gleichungen für Neutrinos zu vereinfachen.

Experten gehen davon aus, dass sich künftig etliche weitere Anwendungen ergeben werden, weil viele naturwissenschaftliche Probleme mit der Berechnung von Eigenvektoren und Eigenwerten zusammenhängen. Der Grund dafür ist, dass sie lineare Transformationen charakterisieren, die ein Objekt dehnen, stauchen, drehen oder anderweitig verändern. Solche Transformationen lassen sich durch



**Lineare Transformation:**  
Die Matrix  $(1, 1 | -1, 2)$   
dreht und verzerrt das  
blaue Rechteck und  
bildet es auf ein Paralle-  
logramm ab (pink).

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

zweidimensionale Listen aus Zahlen darstellen, so genannte Matrizen.

Eine Matrix verändert die »Vektoren« eines Objekts. Diese kann man sich als Pfeile vorstellen, die auf die Punkte eines Objekts zeigen. Eine Matrix verändert sowohl die Länge als auch die Ausrichtung eines solchen Pfeils. Man kann jeder Matrix so genannte Eigenvektoren zuweisen, die durch das Wirken der Matrix gleich ausgerichtet bleiben. Wenn man zum Beispiel eine Matrix betrachtet, die Objekte um 90 Grad um die x-Achse dreht, verlaufen ihre Eigenvektoren entlang der x-Achse, weil sich die Punkte eines Objekts entlang dieser Geraden nicht verschieben.

Eine ähnliche Matrix könnte die Objekte um die x-Achse drehen und zusätzlich um die Hälfte schrumpfen. Wie stark eine Matrix einen Eigenvektor streckt oder staucht, ergibt sich aus dem dazugehörigen Eigenwert – in diesem Fall  $\frac{1}{2}$ . Wenn sich ein Eigenvektor nicht ändert, ist der entsprechende Eigenwert 1.

In der Regel berechnet man Eigenvektoren und Eigenwerte unabhängig voneinander aus den Zeilen und Spalten einer Matrix. In den ersten Semestern der meisten naturwissenschaftlichen Studiengänge lernen Studenten, wie man dies für einfache Matrizen macht. Die neue Formel unterscheidet sich jedoch von den bisherigen Methoden. »Bemerkenswert ist, dass man dazu nie wirklich einen der Einträge der Matrix kennen muss«, erklärt Tao.

Die Formel der drei Physiker gilt nur für »hermitesche« Matrizen, deren Eigenwerte immer reell sind (im Gegensatz zu solchen, die auch imaginäre Beiträge besitzen, also Wurzeln aus negativen Zahlen). Hermitesche Matrizen spielen eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, anwendungsspezifische Dinge zu berechnen, etwa einen Trägheitstensor in der klassischen Mechanik oder das Energiespektrum eines Atoms in der Quantenmechanik.

Denton, Parke und Zhang fanden heraus, dass man die Eigenvektoren einer hermiteschen Matrix berechnen kann, indem man bloß ihre Eigenwerte und die Eigenwerte der dazugehörigen »Untermatrix« auf bestimmte Weise miteinander multipliziert und addiert. Die Untermatrix ergibt sich, indem man bestimmte Zeilen und Spalten der ursprünglichen Matrix streicht. »Im Nachhinein scheint die Formel sinnvoll«, sagt Tao. »Denn die Eigenwerte der Untermatrix enthalten viele versteckte Informationen.« Das sei aber etwas, an das er nicht gedacht hätte.

Die bisher einzige Anwendung der neuen Formel hat mit Neutrinos zu tun. Diese Partikel gehören zu den seltensten und am wenigsten verstandenen Elementarteilchen. Jede Sekunde durchqueren Billionen von ihnen unseren Körper, ohne dass wir es merken. Sie wechselwirken kaum mit anderer Materie, weshalb viele ihrer Eigenschaften bisher unbekannt sind.

Interessanterweise legt die theoretische Physik nahe, dass sich Neutrinos

von ihren Antiteilchen unterscheiden könnten. »Wenn sich Neutrinos anders verhalten als Antineutrinos, könnte das erklären, warum das Universum fast nur aus Materie besteht«, sagt die Physikerin Deborah Harris von der York University und vom Fermilab, die an dem Neutrino-Experiment DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) arbeitet. Denn wären beim Urknall gleich viele Teilchen und Antiteilchen entstanden, hätten sie sich gegenseitig vernichtet. Unser Kosmos wäre dann bis auf die dabei entstandenen Photonen vollkommen leer. Ein Unterschied zwischen Teilchen und Antiteilchen könnte dagegen erklären, warum es von Anfang an mehr Materie gab und wir deshalb fast nur diese um uns herum wahrnehmen.

### Warum unser Kosmos nicht leer ist

Beim DUNE-Experiment schießen die Forscher Neutrinos aus dem Fermilab in Illinois zu einem 1300 Kilometer entfernten unterirdischen Detektor in South Dakota. Dabei nutzen sie aus, dass die geisterhaften Teilchen in drei möglichen Generationen – Elektron-, Myon- oder Tauon-Neutrinos – auftauchen. Die Gesetze der Quantenmechanik führen dazu, dass jedes Neutrino überlagert auftritt, wodurch die Teilchen während ihrer Reise ihre Generation ändern können. Wenn etwa ein Myon-Neutrino das Fermilab verlässt, kann es als Elektron- oder Tauon-Neutrino South Dakota erreichen.

Diese »Neutrinoszillation« beschreibt eine komplizierte Matrix aus drei Zeilen und drei Spalten. Indem Physiker die dazugehörigen Eigenvektoren und Eigenwerte bestimmen, können sie die Wahrscheinlichkeit dafür berechnen, dass sich ein Myon-Neutrino in ein Elektron-Neutrino verwandelt. Das Gleiche können sie für die jeweiligen Antiteilchen tun.

Beide Ausdrücke enthalten eine Unbekannte: die »CP-verletzende Phase«, die angibt, wie sehr sich die Oszillationen von Neutrinos und Antineutrinos unterscheiden. Die Physiker am DUNE-Experiment versuchen diese Größe zu bestimmen, indem sie die

## Der Rechen-trick

Betrachtet man die Matrix

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

lauten die Eigenwerte:  $\lambda_1 = 3$ ,  $\lambda_2 = 0$ ,  $\lambda_3 = 5$ . Die dazugehörigen Eigenvektoren  $v_i$  sind:

$$v_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, v_3 = \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Es lässt sich leicht überprüfen, dass  $M \cdot v_i = \lambda_i \cdot v_i$  für  $i = 1, 2$  und  $3$ . Das heißt, die Matrix  $M$  streckt beziehungsweise staucht den Eigenvektor  $v_i$  um den jeweiligen Faktor  $\lambda_i$ , eine gewöhnliche Zahl, ohne seine Richtung zu verändern.

Um die Eigenvektoren einer Matrix zu berechnen, muss man eigentlich folgende Rechnung lösen:

$$\left( M - \begin{pmatrix} \lambda_i & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_i & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_i \end{pmatrix} \right) \cdot v_i = 0$$

Das sich daraus ergebende lineare Gleichungssystem ist nicht immer einfach zu lösen, wie im Beispiel der Neutrino-Matrix. Die Arbeit von Tao und den drei Physikern hat nun eine neue Möglichkeit eröffnet, die

Eigenvektoren einer Matrix zu berechnen.

Dafür muss man die Eigenwerte der so genannten Untermatrizen kennen. Diese ergeben sich, indem man jeweils die  $j$ -te Spalte und Zeile von  $M$  streicht, also:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}, M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}, M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$$

Die jeweiligen Eigenwerte  $\mu(M_j)_i$  lauten also:  $\mu(M_1)_1 = 4$ ,  $\mu(M_1)_2 = 3$  sowie  $\mu(M_2)_1 = 1$ ,  $\mu(M_2)_2 = 3$  und  $\mu(M_3)_1 = 0$ ,  $\mu(M_3)_2 = 5$ .

Die Formel der Physiker zur Berechnung der Eigenvektoren lautet:

$$|v_{i,j}|^2 \prod_{k=1; k \neq i}^3 (\lambda_i - \lambda_k) = \prod_{k=1}^2 (\lambda_i - \mu(M_j)_k)$$

wobei  $v_{i,j}$  den  $j$ -ten Eintrag des Vektors  $v_i$  beschreibt. Hier ist sie für eine  $3 \times 3$ -Matrix angegeben, doch sie gilt ganz allgemein für  $n \times n$ -Matrizen.

Möchte man den ersten Eigenvektor berechnen, ergibt die Formel folgende Rechnungen:

$$|v_{11}|^2 \cdot (3 - 0) \cdot (3 - 5) = (3 - 4) \cdot (3 - 3) = 0$$

$$|v_{12}|^2 \cdot (3 - 0) \cdot (3 - 5) = (3 - 1) \cdot (3 - 3) = 0$$

$$|v_{13}|^2 \cdot (3 - 0) \cdot (3 - 5) = (3 - 0) \cdot (3 - 5) \Rightarrow |v_{13}|^2 = 1$$

einfallenden Neutrinos und Antineutrinos detektieren. Ist die CP-verletzende Phase groß genug, könnte dies erklären, warum unser Universum mit Materie gefüllt ist.

Allerdings erschwert ein bizarrer Effekt die Neutrino-Matrix, den der Physiker Lincoln Wolfenstein 1978 entdeckte. Obwohl sie kaum miteinander wechselwirken, erkannte Wolfenstein, dass sich Neutrinos in Materie anders ausbreiten als im Vakuum. Dadurch verändern sich die Wahrscheinlichkeiten, dass sich die Geisterteilchen in eine andere Generation umwandeln. Der Effekt führt zu einem weiteren Term in der Neutrino-Matrix, der sie enorm verkompliziert. Parke, Zhang und Denton suchten deshalb nach einem Weg, die Berechnungen zu vereinfachen.

Die drei Physiker hatten zuvor eine Methode entwickelt, um die Eigenwerte der Neutrino-Matrix präzise anzunähern. Die Eigenvektoren lassen sich jedoch nicht so einfach bestimmen. Als Parke, Denton und Zhang die Eigenwerte genauer untersuchten, fiel ihnen auf, dass sich die langen Ausdrücke für die Eigenvektoren, die in früheren Werken berechnet wurden, aus einer speziellen Kombination der Eigenwerte ergeben. »Damit lässt sich die Neutrinooszillation in Materie extrem schnell und einfach berechnen«, begeistert sich Zhang.

Die Forscher hatten ein gewisses Muster zwischen den Eigenwerten und Eigenvektoren bemerkt, das sie dann verallgemeinerten. Dass ihre Forschung zu einer neuen Erkenntnis der linearen Algebra geführt hat,

verunsichert sie derweil ein wenig.

»Seit sehr langer Zeit nutzen verschiedenste Wissenschaftler die Werkzeuge dieser Disziplin«, sagt Parke. Deswegen warte er nur darauf, dass ihm jemand eine alte Arbeit zeigt, in der diese Formel auftaucht.

Tatsächlich existierte bereits ein ähnlicher Ausdruck, der jedoch unbeachtet blieb. Im September erreichte Tao eine E-Mail von Jiyuan Zhang, einem Mathematikstudenten an der University of Melbourne. Dieser verwies auf eine Arbeit, die er mit seinem Betreuer Peter Forrester bereits im Mai veröffentlicht hatte – noch vor Tao und den drei Physikern. Forrester und Zhang hatten sich dabei an einem Aufsatz von Yuliy Baryshnikov an der University of Illinois orientiert, der eine solche Gleichung in anderer Form

2001 gefunden hatte. Die Mathematiker nutzten diese aber nicht, um Eigenvektoren zu berechnen, sondern um die Eigenwerte gewisser Untermatrizen zu bestimmen.

»Angesichts der Bedeutung von Eigenvektoren in naturwissenschaftlichen Anwendungen sind wir der Meinung, dass unser Ergebnis sich stark genug von dem vorigen unterscheidet, um als neu angesehen zu werden«, sagt Denton. Wer auch immer als Erstes diesen Zusammen-

hang aufdeckte – es bleibt extrem erstaunlich, dass eine so fundamentale und einfache Verbindung zwischen Eigenwerten und Eigenvektoren so lange verborgen blieb. ◀

**Natalie Wolchover** ist Physikerin und Wissenschaftsjournalistin in New York.

#### QUELLEN

**Denton, P. B. et al.:** Eigenvectors from Eigenvalues: A survey of a basic identity in linear algebra. ArXiv 1908.03795, 2019

**Denton, P. B. et al.:** Eigenvalues: The Rosetta Stone for Neutrino Oscillations in Matter. ArXiv 1907.02534, 2019

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Neutrinos Lead to Unexpected Discovery in Basic Math« 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.



## QUANTENMECHANIK DIE KÄLTESTE REAKTION ALLER ZEITEN

**Zum ersten Mal hat eine Forschungsgruppe eine chemische Reaktion bei nur 500 milliardstel Kelvin über dem absoluten Temperaturnullpunkt ablaufen lassen. Das ermöglichte einen Blick auf sonst kaum greifbare Zwischenprodukte.**

► Den energetischen Verlauf einer chemischen Reaktion kann man sich vereinfacht wie den Querschnitt durch eine Berglandschaft vorstellen: Ausgangsmaterialien und Produkte liegen in Tälern auf zwei Seiten, dazwischen befindet sich mindestens ein Hügel. Bevor eine Reaktion vonstattengeht, muss man zunächst genügend Energie aufbringen, um diese Barriere zu überwinden. Denn damit aus den Ausgangsmolekülen die Produkte entstehen, müssen einige Bindungen zwischen Atomen brechen und sich neu bilden, während andere ihre Längen oder die Winkel zueinander ändern.

Manche Reaktionen verlaufen gleich über mehrere Hügel, zwischen denen sich dann zwangsläufig Täler befinden. Würde man betrachten, wie sich die Moleküle während einer solchen Reaktion verändern, könnte man beobachten, dass sich in jedem Tal ein Zwischenprodukt bildet. Dieses ist nur für kurze Zeit stabil und ähnelt dem Produkt schon etwas mehr als der Ausgangsstoff.

Einer Reaktion zuzuschauen, während sie abläuft, ist allerdings in vielen Fällen sehr schwierig. Das liegt daran, dass chemische Bindungen innerhalb von Femtosekunden – also mehreren

Billionsteln einer Sekunde – brechen und sich neu bilden können. Wenn nun ein Zwischenprodukt derart schnell zum Endprodukt weiterreagiert, sind altbewährte Analysemethoden wie die Röntgenkristallografie oder Spektrometer mit konventionellen Lichtquellen schlicht zu langsam.

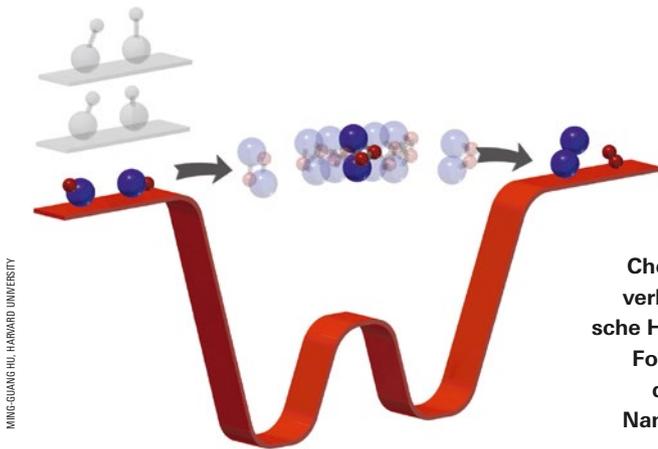
Um auch sehr rasche Reaktionen verfolgen zu können, gibt es heute verschiedene Möglichkeiten. Die bekannteste davon ist wohl die Femtochemie, bei der man mit ultrakurzen Laserpulsen Schnappschüsse von dem erhält, was während einer Reaktion passiert. Das mit dem Nobelpreis geehrte Fachgebiet hat in den vergangenen etwa 30 Jahren geholfen, die Reaktionswege vieler chemischer Umwandlungen nachzuvollziehen, darunter solcher, die große industrielle Bedeutung haben.

In jüngerer Zeit hat sich ein neuer Ansatz dazugesellt: die ultrakalte Chemie. Dabei nutzt man aus, dass Reaktionen umso langsamer ablaufen, je niedriger die Umgebungstemperatur ist. Diesen Zeitlupen-Trick hat jetzt eine Forschungsgruppe von Kang-Kuen Ni von der Harvard University zum ersten Mal benutzt, um das Zwischenprodukt einer Reaktion zu Gesicht zu bekommen.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler untersuchten den Zerfall von Kalium-Rubidium-Molekülen (KRb) in  $K_2$  und  $Rb_2$ . Computersimulationen hatten bereits vorhergesagt, dass sich dabei zunächst  $K_2Rb_2$ -Moleküle bilden, bevor die Endprodukte entstehen. Dieses flüchtige Zwischenprodukt bekäme man bei der normalen Reaktionsdauer im Bereich von Femtosekunden nicht zu sehen. Ni und ihre Gruppe schafften es dennoch, einen Blick darauf zu erhaschen, indem sie seine Lebensdauer auf etwa drei Mikrosekunden verlängerten. Das klingt zwar immer noch kurz, ist aber eine Milliarde Mal länger: Es entspricht damit dem Unterschied zwischen einer Sekunde und gut 30 Jahren.

Um die Reaktion derart zu bremsen, mussten sie die KRb-Teilchen massiv abkühlen, und zwar fast bis zum absoluten Temperaturminimum bei null Kelvin, also minus 273,15 Grad Celsius. Bis auf 500 Nanokelvin schaffte es die Gruppe den Ausgangsstoff herunterzukühlen. Damit ist die Reaktion die kälteste, die jemals vonstattengegangen ist! Selbst Molekülwolken im interstellaren Medium sind etwa eine Million Mal wärmer.

Allerdings brauchen chemische Reaktionen zumindest ein bisschen



**Chemische Reaktionen verlaufen über energetische Hügel und Täler. Eine Forschungsgruppe hat den Vorgang bei 500 Nanokelvin eingefroren.**

Umgebungswärme, um die Hügel – wenn auch im Schneckentempo – zu überwinden. Bei Temperaturen von einigen hundert Nanokelvin sind die Teilchen derart träge, dass sie fast gar nicht mehr miteinander reagieren. Wie haben es Ni und ihr Team trotzdem geschafft, die Reaktion bei der extremen Kälte ablaufen zu lassen?

### Teilchen ohne Bewegungsfreiheit

Hier kommt die Quantenmechanik ins Spiel. Anstatt den energetischen Hügel zu erklimmen und auf der anderen Seite wieder herunterzurollen, können Moleküle auch einen Tunnel durch den Hügel hindurchgraben. Wie wahrscheinlich es ist, dass sie dies tatsächlich tun, hängt von der Höhe des Hügels ab.

Vor zehn Jahren bereits gelang es Fachleuten, unter anderem der Gruppe um Ni, die Reaktionsbarriere der Zerfallsreaktion von KRb in  $K_2$  und  $Rb_2$  gezielt zu erhöhen oder abzusenken. Dazu veränderten sie die quantenmechanischen Zustände der Ausgangsstoffe. Ein solcher Zustand umfasst Parameter wie Spin und Drehimpuls. Zunächst schalteten sie mit Hilfe spezieller Laser alle Bewegungsfreiheitsgrade der Moleküle aus, das heißt, sie versetzten sie in ihren absoluten Grundzustand. So konnten die Teilchen sich weder im Raum bewegen noch rotieren oder entlang ihrer Atombindung aufeinander zu- und voneinander wegschwingen. Da sie also keine Energie mehr in Form von Bewegungen speicherten, waren sie extrem kalt und nicht in der Lage, auf

gewöhnliche Weise zusammenzustoßen und zu reagieren. In diesem Zustand gelang es den Wissenschaftlern, auch die Spineigenschaften der Teilchen zu verändern. Über das Feintuning war es ihnen möglich zu beeinflussen, wie viel des Endprodukts gebildet wurde: Besaßen alle Moleküle denselben Spinzustand, entstand fast eine Sekunde lang kein Produkt. Dagegen reagierten die Teilchen 10- bis 100-mal schneller, wenn die Spinzustände gemischt waren. Andere Gruppen haben die ultrakalte Chemie genutzt, um ganz neue chemische Spezies herzustellen, etwa  $BaOCa^+$ .

Mit solchen quantenmechanischen Manipulationen ist es der Gruppe um Ni nun gelungen, Zwischen- sowie Endprodukte einer extrem kalten Reaktion zu charakterisieren. Dazu stellten sie zunächst den Ausgangsstoff, KRb, aus Kalium- und Rubidiumatomen her. Normalerweise würden diese gar nicht miteinander reagieren, erst ein geschickt eingestelltes Magnetfeld bringt sie dazu. Weil sich die so gebildeten KRb-Moleküle in einem angeregten Schwingungszustand befanden (das heißt, die beiden Atome konnten sich entlang ihrer Bindung aufeinander zu- und voneinander wegbewegen) und dadurch wenig stabil waren, überführten die Forscher sie anschließend mit gezielten Laserpulsen in ihren Grundzustand (in dem sie dies nicht konnten). Die KRb-Teilchen hielten sie dabei mit einer optischen Pinzette fest, zogen sie also immer wieder in den Fokus eines Laserstrahls.

Anschließend bestrahlte das Team die KRb-Moleküle mit ultravioletten Laserpulsen. Die Energie reichte aus, um den Zerfall in  $K_2$  und  $Rb_2$  in Gang zu setzen. Gleichzeitig bewirkte die Energiezufuhr, dass das Zwischenprodukt  $K_2Rb_2$  in einem angeregten Zustand existierte, den ein Stern in der chemischen Formel verdeutlicht:  $K_2Rb_2^*$ .

Um diesen intermediären Komplex sowie die Ausgangs- und die Endstoffe zu detektieren, schlossen die Chemiker ein spezielles Massenspektrometer an ihren ultrakalten Apparat an, das die Geschwindigkeitsverteilungen aller entstehenden Spezies kartierte. Auf diese Weise konnten sie Ausgangsstoffe, Zwischenprodukt und Endprodukte identifizieren.

Die Studie von Ni und ihrer Forschungsgruppe ist ein erster Schritt, die weitgehend unerforschte Welt der ultrakalten Chemie zu erkunden. Mit ihrem Apparat, der es erlaubt, Stoffe bis fast zum Temperaturnullpunkt herunterzukühlen – und der damit weltweit einzigartig ist –, lassen sich viele weitere Fragen untersuchen. Ming-Guang Hu, ein Postdoc in Nis Gruppe und Erstautor der Veröffentlichung, schlägt vor, im nächsten Schritt mit der Technik in eine chemische Reaktion einzugreifen. Man könnte etwa Moleküle im angeregten Zustand miteinander reagieren lassen oder einzelne Teilchen anstoßen und die Effekte beobachten. Auf solche Weise lässt sich wohl auch der Einfluss der Quantenmechanik auf chemische Reaktionen bei extrem niedrigen Temperaturen weiter entschlüsseln. ◀

**Anna Clemens** ist promovierte Materialwissenschaftlerin und Wissenschaftsjournalistin in Prag.

### QUELLEN

**Hu, M. G. et al.:** Direct observation of bimolecular reactions of ultracold KRb molecules. *Science* 366, 2019

**Ospelkaus, S. et al.:** Quantum-state controlled chemical reactions of ultracold potassium-rubidium molecules. *Science* 327, 2010

**Puri, P. et al.:** Synthesis of mixed hypermetallic oxide  $BaOCa^+$  from laser-cooled reagents in an atom-ion hybrid trap. *Science* 357, 2017



## SPRINGERS EINWÜRFE DIGITALER ENERGIEHUNGER

**Bringt der explosiv wachsende Datenverkehr unweigerlich einen ebenso stark hochschießenden Stromverbrauch mit sich – oder wird es gelingen, die beiden Größen zu entkoppeln?**

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

» [spektrum.de/artikel/1714802](https://spektrum.de/artikel/1714802)

Vor Jahrzehnten, als die umfassende Digitalisierung noch Zukunftsmusik war, sahen Trendforscher in ihr die Lösung der meisten Energie-, Verkehrs- und Umweltprobleme. In der schönen neuen Welt der Bits und Bytes würde das meiste im weltweiten Netz, elektronisch und virtuell ablaufen. Industrieroboter würden menschenleere Fabriken bevölkern, die Arbeiter an Bildschirmen von Weitem die Produktion überwachen. Die Angestellten müssten nicht mehr täglich zu großen Bürogebäuden pendeln, sondern blieben daheim in ihrem Homeoffice. Politiker und Manager bräuchten nicht mehr zu internationalen Tagungen anzureisen, sondern würden sich durch Videokonferenzen kostspielige und umweltbelastende Flüge sparen.

Nun, da die Digitalisierung tatsächlich Fahrt aufnimmt, kommen ihre Gestehungskosten ins Bild. Die globale Vernetzung verlangt eine wachsende Anzahl riesiger Rechenzentren, die Unmengen an Daten sammeln, speichern und versenden – und entsprechend viel Energie benötigen. Experten schätzen, dass der weltweite Strombedarf solcher Anlagen zwischen 2005 und 2010 von gut 150 Terawattstunden (TWh) auf rund 250 TWh pro Jahr wuchs (das entspricht dem Verbrauch von mehr als einer halben Milliarde 50-Watt-Birnen, die ununterbrochen leuchten). Die ungebremsste Fortsetzung dieses steilen Trends würde das strahlende Image der Digitalisierung merklich trüben.

Gewiss werden künftig, während Mobilfunk, selbstfahrender Verkehr und künstliche Intelligenz den Globus umfassen, die zu verarbeitenden Datenmengen rapide wachsen. Aber muss zugleich die Digitalisierung energetisch komplett aus dem Ruder laufen?

Nicht unbedingt, beruhigen US-Ingenieure um Eric Masanet von der Northwestern University in Evanston (Illinois). Der Fortschritt der Datenverarbeitungstechnik

habe seit 2010 die Energieeffizienz so drastisch verbessert, dass der einschlägige Stromverbrauch bis 2018 nur um sechs Prozent zugenommen habe, obgleich sich im selben Zeitraum die Menge der in globalen Datenzentren bewältigten Rechenschritte mehr als verfünffacht habe. Offenbar sei es gelungen, das Wachstum des digitalen Energiehungers weitgehend vom anfallenden Datenvolumen zu entkoppeln (*Science* 367, S. 984–986, 2020).

Das nährt die Hoffnung, dass die Digitalisierung in den kommenden Jahrzehnten nicht überproportional viel Energie verschlingen wird, sondern weiterhin »nur« ein bis zwei Prozent des – allerdings stark wachsenden – weltweiten Strombedarfs. Freilich, so die Autoren der Studie, dürfe sich die Daten verarbeitende Industrie nicht auf ihren Lorbeeren ausruhen: In den nächsten drei oder vier Jahren werde sich das Volumen der Clouds verdoppeln.

Ist die kurzfristig beruhigende Prognose auf lange Sicht allzu optimistisch? Der datentechnische Fortschritt wird wohl noch weitere Energieeinsparungen bringen, gewiss aber auch neue Verfahren, die verschwenderischen Aufwand erfordern. Angenommen, Quantencomputer erweisen sich wie erhofft als der letzte Schrei und erobern allmählich die Datenzentren: Damit etabliert sich eine äußerst empfindliche Technik, die extreme Tiefkühlung und fast totale Abschirmung von der Umwelt erfordert.

Oder was wäre, wenn sich die vorderhand nur punktuell eingesetzten Blockchain-Verfahren breit durchsetzten, die für ihre besonders hohe Datensicherheit den Preis dezentraler und entsprechend energieaufwändiger Verarbeitung verlangen? Der energetische Preis der Digitalisierung wird vielleicht nicht so exorbitant steigen wie zunächst befürchtet – aber wachsen wird er in jedem Fall.

# MEDIZIN DIE VIRENJÄGERIN

Fledermäuse bilden ein natürliches Reservoir für zahlreiche Coronaviren. Von ihnen stammt wohl auch der Erreger der aktuell grassierenden Covid-19-Pandemie. Forscher wie die chinesische Virologin Shi Zenghli fordern, proaktiv nach Viren zu suchen, die auf den Menschen überzuspringen drohen – bevor es erneut zu einem Ausbruch kommt.



WUHAN INSTITUTE OF VIROLOGY



Jane Qiu arbeitet als Wissenschaftsautorin in Peking, China. Sie interessiert sich besonders für das Hochland von Tibet und die umgebenden Gebirgszüge.

» [spektrum.de/artikel/1714778](https://www.spektrum.de/artikel/1714778)



WUHAN INSTITUTE OF VIROLOGY



Auf dieser Aufnahme von 2004 entlässt Shi Zhengli einen Flughund in die Freiheit, nachdem sie Proben von ihm genommen hat (großes Bild). In diesem Jahr begann sie, mit einem internationalen Forscherteam systematisch Blut- und Speichelproben von wilden Fledermäusen zu analysieren, um darin Viren zu finden, die dem Menschen gefährlich werden können (kleines Bild).



Die Besorgnis erregenden Proben trafen am 30. Dezember 2019 um 19 Uhr im Wuhan-Institut für Virologie ein. Wenige Augenblicke später klingelte das Handy von Shi Zhengli – ihr Chef, der Direktor des Instituts, rief an. Das Zentrum für Seuchenkontrolle und -prävention der Stadt Wuhan hatte bei zwei Patienten mit einer atypischen Lungenerkrankung (Pneumonie) ein neuartiges Coronavirus entdeckt. Man wolle, dass Shi Zhengli und ihr renommiertes Labor der Sache nachgingen. Falls sich der Verdacht auf einen neuen Erreger bestätigen würde, könnte dieser eine ernsthafte Bedrohung für die Gesundheit der Bevölkerung darstellen. Er gehöre nämlich zu einer Familie von Viren, die von Fledermäusen übertragen werden und die auch die Atemwegserkrankung Sars verursacht hatten, das schwere akute respiratorische Syndrom. Zwischen 2002 und 2003 waren 8100 Menschen an Sars erkrankt, von denen fast 800 starben. »Lassen Sie alles stehen und liegen und kümmern Sie sich umgehend darum«, erinnert sich Shi an die Worte des Direktors.

Shi ist Virologin – und auch bekannt als »Batwoman«. So jedenfalls nennen viele Kollegen die Forscherin, weil sie seit 16 Jahren in Fledermaushöhlen auf Virenjagd geht. Nachdem sie das Telefonat mit ihrem Chef beendet hatte, verließ sie die Konferenz, an der sie eben noch in Schanghai teilgenommen hatte, und stieg in den nächsten Zug nach Wuhan. »Ich hatte mich gefragt, ob sich (die städtische Gesundheitsbehörde) geirrt hatte«, sagt Shi. »Ich hätte nie damit gerechnet, dass so etwas in Wuhan, in Zentralchina, passieren würde.« Bei ihren bisherigen Untersuchungen hatte sie eigentlich die subtropischen Provinzen Guangdong, Guangxi und Yunnan im Süden des Lands als jene Regionen ausgemacht, in denen Coronaviren am wahrscheinlichsten vom Tier auf den Menschen überspringen – insbesondere von Fledermäusen. Diese Säugetiere gelten als berüchtigtes Reservoir vieler Krankheitserreger. Falls die neuen Keime wirklich Coronaviren sein sollten, befürchtete Shi in diesem Moment: »Könnten sie vielleicht versehentlich aus unserem Labor freigesetzt worden sein?«

Während Shis Team am Institut der Chinesischen Akademie der Wissenschaften fieberhaft nach dem Ansteckungs-

## AUF EINEN BLICK TICKENDE ZEITBOMBE

- 1** Fledermäuse sind ein natürliches Reservoir für diverse Stämme von Coronaviren, von denen einige auch auf Menschen oder andere Tiere überspringen können.
- 2** Auch das neu auftretende Coronavirus, das die weltweite Covid-19-Pandemie verursacht, stammt wohl aus Fledermäusen.
- 3** Die Gefahr, dass solche Keime auf den Menschen überwechseln, ist überall dort besonders hoch, wo die Bevölkerung eng zusammenlebt und die natürliche Umwelt massiv verändert wird.

herd und der Art des Erregers suchte, breitete sich die neue Erkrankung aus wie ein Lauffeuer. Bis zum Redaktionsschluss sind laut WHO in China etwa 81500 Menschen infiziert worden; rund 84 Prozent davon leben in der Provinz Hubei, deren Hauptstadt Wuhan ist. Mehr als 3200 Betroffene sind dem Virusinfekt erlegen. Außerhalb der Volksrepublik haben sich mittlerweile mehr als 210000 Menschen in mehr als 180 Ländern auf allen Kontinenten (mit Ausnahme der Antarktis) angesteckt; fast 10000 dieser Patienten sind gestorben.

Es ist eine der schlimmsten Epidemien der letzten Jahrzehnte. Schon seit Langem warnen Wissenschaftler davor, dass neue Infektionskrankheiten viel häufiger auftreten könnten – insbesondere in Entwicklungsländern, wo Mensch und Tier dicht aufeinander leben und dadurch verstärkt miteinander in Kontakt kommen.

»Es ist unglaublich wichtig, die Infektionsquelle und den artübergreifenden Übertragungsweg genau zu bestimmen«, mahnt der Krankheitsökologe Peter Daszak. Er ist Präsident der EcoHealth Alliance, einer gemeinnützigen Forschungseinrichtung mit Sitz in New York City, die mit Wissenschaftlern weltweit – darunter Shi – zusammenarbeitet, um neue Viren bei Wildtieren zu entdecken. Ebenso bedeutsam sei laut Daszak die Suche nach verwandten Krankheitserregern – den »bekannten Unbekannten« –, um »zu verhindern, dass sich ähnliche Vorfälle wiederholen«.

Ihre erste Virus-Expedition kam Shi vor wie ein Urlaub. Es war ein sonniger Frühlingstag im Jahr 2004. Die Wissenschaftlerin sammelte mit einem internationalen Forscherteam Proben von Fledermauskolonien, die in Höhlen nahe Nanning hausten, der Hauptstadt der autonomen Region Guangxi. Die erste Grotte war groß, gut zugänglich und wies zahlreiche Kalksteinsäulen auf – ein beliebtes Touristenziel. »Die Höhle war faszinierend«, erinnert sich Shi. Weißliche Stalaktiten hingen wie Eiszapfen von der Decke, die Feuchtigkeit ließ die Tropfsteine glänzen.

Doch die Urlaubsstimmung verflog bald. Viele Fledermäuse – dazu gehören auch mehrere Arten der Insekten fressenden Hufeisennasen, die in Südasien weit verbreitet sind – leben in tiefen, engen Höhlen, die in bergigem Gelän-

de liegen. Shi und ihre Kollegen mussten stundenlang zu möglichen Siedlungsplätzen wandern und bäuchlings durch enge Felsspalten kriechen. Aber die fliegenden Säugetiere sind schwer zu fassen. In einer für die Forscher besonders entmutigenden Woche hatte das Team mehr als 30 Grotten durchsucht und nur ein Dutzend Fledermäuse gefunden.

Das Ziel dieser Expeditionen war es, jenes Virus dingfest zu machen, das zum Sars-Ausbruch geführt hatte. Sars löste die erste große Epidemie des 21. Jahrhunderts aus. Ein Team aus Hongkong hatte berichtet, dass sich Wildtierhändler in der Provinz Guangdong das Sars-Coronavirus als Erste eingefangen hatten – und zwar von Zibetkatzen. Diese den Mungos ähnelnden Säugetiere sind im tropischen und subtropischen Asien und Afrika heimisch.

### **Tierpathogene, die auf den Menschen überzuwechseln drohen**

Vor Sars hatte die Welt kaum etwas von Coronaviren gehört, erinnert sich der Virologe Linfa Wang. Er leitet das Studienprogramm für neu auftretende Infektionskrankheiten an der Duke-NUS Medical School in Singapur. Coronaviren waren ihm zufolge eigentlich nur dafür bekannt, dass sie eine gewöhnliche Erkältung auslösen können. »Der Ausbruch von Sars veränderte die Lage.« Wang forscht über Coronaviren, die von Fledermäusen übertragen werden. Mit dem Sars-Erreger, betont er, sei erstmals ein tödliches Coronavirus aufgetreten, das pandemisches Potenzial besaß. Diese Entdeckung ließ die Wissenschaftswelt aufhorchen. Es begann die weltweite Suche nach Viren, die in Tieren schlummern und auch Menschen infizieren könnten.

Shi war eine der Ersten auf diesem Forschungsgebiet. Von Beginn an waren Daszak und Wang ihre Wegbegleiter. Schon bald standen sie bei ihren Untersuchungen vor einem Rätsel: Wie hatten sich die Zibetkatzen mit dem Erreger angesteckt, der später beim Menschen Sars auslöste? Zwei frühere Vorfälle erwiesen sich hier als aufschlussreich: In Australien sprang 1994 das Hendra-Virus von Pferden auf den Menschen über, und 1998 kam es zu einem Ausbruch des Nipah-Virus in Malaysia, bei dem die Keime von Schweinen auf Menschen überwechselten. Beide Erreger finden sich sonst in Früchte fressenden Fledermäusen. Pferde und Schweine waren also lediglich die Zwischenwirte gewesen.

Die ersten Monate der Virenjagd von 2004 verbrachten Shi und ihre Kollegen damit, tagsüber an den Eingängen von Fledermaushöhlen Netze aufzuspannen. Dann warteten die Forscher, bis die nachtaktiven Flugtiere zur Nahrungssuche ausschärmten. Von den gefangenen Individuen nahmen die Virologen Blut- und Speichelproben sowie Kotabstriche. Oft arbeiteten die Forscher bis in die frühen Morgenstunden. Nachdem sie etwas geschlafen hatten, kehrten sie am Vormittag in die Höhlen zurück, um Urin und Kotklümpchen zu sammeln.

Doch die Ergebnisse ihrer Arbeit waren niederschmetternd. Keine Probe erbrachte einen Hinweis auf Genmaterial von Coronaviren. »Acht Monate harter Arbeit schienen umsonst gewesen zu sein«, sagt Shi. Das Team stand kurz davor, die Arbeit einzustellen, als es von einem Labor ein Diagnosekit erhielt. Damit ließen sich Antikörper nachweisen, die bei einer Sars-Infektion im menschlichen Blut gebil-

**Fledermäuse der Spezies Große Hufeisennase (*Rhinolophus ferrumequinum*) schlafen in einer Höhle.**



REMISSO / GETTY IMAGES / ISTOCK

## Vom Tier auf den Menschen

Auf den geschäftigen Wildmärkten Chinas werden auf engstem Raum die verschiedensten Tiere angeboten – Fledermäuse, Zibetkatzen, Pangoline (Schuppentiere), Dachse, Krokodile. Viren haben hier beste Bedingungen, sich zu vermehren. Es kann zwar sein, dass sich Menschen mit dem neuen Coronavirus direkt bei Fledermäusen angesteckt haben. Doch manche Forscher sind der Ansicht, Pangoline hätten als Zwischenwirte gedient. Diese Wissenschaftler haben Sars-CoV-2-ähnliche Coronaviren bei Schuppentieren entdeckt, die bei Razzien in Südchina beschlagnahmt wurden.

Am 24. Februar 2020 kündigte die chinesische Regierung an, den Verzehr und Handel mit Wildtieren dauerhaft zu untersagen. Ausgenommen sind Zootiere und die Verwendung von Wildtieren für medizinische und allgemeine Forschungszwecke. Laut einem Bericht, den die Chinesische Akademie für Ingenieurwesen 2017 in Auftrag gegeben hatte, wird damit ein Markt im Wert von 76 Milliarden

Dollar zerschlagen. Etwa 14 Millionen Menschen dürften ihre Arbeit verlieren. Einige Experten begrüßten die Entscheidung, andere wie der Krankheitsökologe Peter Daszak befürchteten, dass ein pauschales Verbot – ohne begleitende Aufklärung und das Angebot beruflicher Alternativen – die Händler in den Untergrund treiben könnte. Dann könnte es noch schwieriger werden, neue Erkrankungen zu entdecken. »Der Verzehr von Wildtieren ist seit Jahrtausenden eine Kulturtradition in Südchina«, sagt Daszak. »Das lässt sich nicht über Nacht ändern.«

Und Shi Zhengli betont: »Der Handel und der Konsum von Wildtieren sind nur ein Teil des Problems.« Ende 2016 erkrankten auf vier Bauernhöfen im Bezirk Qingyuan in Guangdong zahlreiche Schweine – fast 100 Kilometer von dem Ort entfernt, an dem der Sars-Ausbruch seinen Anfang nahm. Die Tiere mussten sich erbrechen und hatten starken Durchfall. Fast 25000 Schweine starben. Die Tierärzte konnten

keinen bekannten Erreger nachweisen und fragten bei Shi an. Ihre Forschergruppe stellte fest: Der Erreger des »akuten Durchfall-Syndroms bei Schweinen« (Swine Acute Diarrhea Syndrome, kurz Sads) stimmte zu 98 Prozent mit dem Erbgut eines Coronavirus überein, das in Hufeisennasen einer nahe gelegenen Höhle zirkulierte.

»Wir haben ernsthaft Grund zur Sorge«, sagt Gregory Gray, der an der Duke University in Durham die Epidemiologie von Infektionskrankheiten erforscht. Da Schweine und Menschen ein sehr ähnliches Immunsystem haben, könnten solche Viren leicht von einer Spezies auf die andere wechseln. Darüber hinaus fand ein Forscherteam der Zhejiang-Universität in Hangzhou heraus, dass die Sads-Viren nicht nur Menschen und Schweine befallen, sondern auch Nager, Hühner und Primaten. In vielen Ländern wie China und den USA werden zahlreiche Schweine gehalten. Laut Gray ist es daher dringend erforderlich, nach neuartigen Coronaviren in Schweinen zu suchen.

det werden. Ob der Test bei Fledermaus-Antikörpern anschlagen würde, dazu gab es keinerlei Erfahrungswerte. Shi probierte es trotzdem. »Was hatten wir zu verlieren?«, erinnert sie sich. Der Versuch war erfolgreich: Die Proben von drei Arten der Hufeisennasen enthielten Antikörper gegen das Sars-Virus. »Das war der entscheidende Moment für das Projekt«, sagt Shi. Die Forscher fanden heraus, dass der Erreger in Fledermäusen immer nur kurz und nur zu bestimmten Zeiten zirkuliert. Die Antikörper dagegen können wochen- oder jahrelang nachweisbar sein. Das Diagnosekit lieferte also einen wichtigen Hinweis darauf, wie sich Spuren des Virus ausfindig machen lassen.

Mit Hilfe des Antikörpertests konnte Shis Team die Suche nach dem Ursprung der Pandemie eingrenzen. Nachdem sie die Bergregionen in den meisten chinesischen Provinzen durchkämmt hatten, befassten sich die Forscher mit der Shitou-Höhle am Rand von Kunming, der Hauptstadt von Yunnan. Rund fünf Jahre lang nahmen sie dort zu verschiedenen Jahreszeiten Proben von Fledermäusen.

Die Mühe lohnte sich. Die Virenjäger entdeckten hunderte Coronaviren, die eine große genetische Vielfalt bezeugten. »Die meisten von ihnen waren harmlos«, sagt Shi. Aber

einige Dutzend gehörten zur selben Gruppe wie Sars. Im Laborversuch infizierten sie menschliche Lungenzellen und verursachten bei Mäusen sarsähnliche Krankheiten.

In der Shitou-Höhle hatte das Forscherteam eine ganze Bibliothek von Fledermausviren ausfindig gemacht. 2013 stießen sie dort auch auf einen Coronavirenstamm von Hufeisennasen, dessen Genom zu 97 Prozent mit dem jenes Erregers übereinstimmte, der bei Zibetkatzen in Guangdong identifiziert worden war. Damit war nach zehn Jahren endlich das natürliche Reservoir des Sars-Coronavirus gefunden.

Shi hat Proben noch aus zahlreichen weiteren Fledermaushöhlen gesammelt, in denen »durch das ständige Vermischen verschiedener Viren gefährliche neue Krankheitserreger entstehen können«, so der Virologe Ralph Baric von der University of North Carolina in Chapel Hill. Im Umfeld solcher viralen Schmelztiegel, schildert Shi, »muss man kein Wildtierhändler sein, um sich zu infizieren«. In der Nähe der Shitou-Höhle zum Beispiel liegen viele Dörfer an dicht bewachsenen Berghängen. Die Region ist bekannt für ihre Rosen, Orangen, Walnüsse und Weißdornbeeren. Im Oktober 2015 sammelten Shi und ihre Kollegen Blutproben



LINFA WANG

von mehr als 200 Menschen aus vier dieser Dörfer. Das Ergebnis: Bei sechs Probanden, also bei fast drei Prozent, ließen sich Antikörper gegen sarsähnliche Coronaviren im Blut nachweisen – obwohl keiner der Dorfbewohner je mit Wildtieren in Berührung gekommen war oder die typischen Symptome einer Sars-Erkrankung ausgeprägt hatte. Lediglich einer von ihnen hatte vor dem Zeitraum der Studie einmal Yunnan verlassen. Doch alle berichteten, sie hätten schon Fledermäuse über ihrem Dorf beobachtet.

Drei Jahre zuvor hatte Shis Team den Schacht einer Mine in der Gebirgsregion Mojiang (Provinz Yunnan) untersucht. Sechs Bergleute waren dort an Atemwegskomplikationen erkrankt, zwei von ihnen starben daran. Nachdem die Forscher in der Höhle ein Jahr lang Proben genommen hatten, entdeckten sie bei sechs Fledermausarten eine große Vielfalt an Coronaviren. Oft erwies sich ein einziges Tier als von mehreren Virusstämmen infiziert. Diese Säuger waren buchstäblich fliegende Virenfabriken!

### In den Lebensraum von Wildtieren eingedrungen

»In dem Minenschacht stank es wie die Hölle«, sagt Shi. Zusammen mit ihren Kollegen betrat sie die Mine in Schutzmaske und -kleidung. »Alles war mit Fledermauskot verdeckt, auf dem Pilze wucherten.« Obwohl sich letztlich herausstellte, dass eine dieser Pilzarten die Minenarbeiter krank gemacht hatte, wäre es nach Ansicht von Shi nur eine Frage der Zeit gewesen, bis sich die Arbeiter auch Coronaviren eingefangen hätten, wenn man die Mine nicht umgehend geschlossen hätte.

Pandemien durch bislang unbekannte Krankheiten sind rein rechnerisch unvermeidbar. Und die Gründe sind vielfältig. Erstens gibt es immer mehr Menschen, die zunehmend Lebensräume von Wildtieren für sich beanspruchen. Zweitens hat sich die Landnutzung stark geändert. Drittens werden Wild- und Nutztiere rund um den ganzen Globus transportiert – und überhaupt Tierprodukte um die ganze Welt befördert. Viertens hat der weltweite Reiseverkehr stark zugenommen. Die Infektionsrisiken, die damit einhergehen, bereiten Shi und anderen Forschern schon seit Jahren schlaflose Nächte. Vor etwa einem Jahr veröffentlichte ihr Team zwei umfassende Übersichtsarbeiten über Coronaviren. Die Virologin und ihre Koautoren hatten zahlreiche Studien ausgewertet, einschließlich ihrer eigenen, die in führenden Journals wie »Nature« oder »Science« erschienen sind. Ihr Fazit war beunruhigend: Es bestehe das Risiko, dass auch künftig Epidemien durch Coronaviren ausbrechen könnten – übertragen von Fledermäusen.

### Der Kleine Langzungenflughund (*Eonycteris spelaea*) lebt in höhlenreichen Gebieten Ost- und Südasiens.

Als Shi am 30. Dezember 2019 im Zug zurück nach Wuhan saß, diskutierte sie mit ihren Kollegen, wie die Patientenproben zu untersuchen seien. Die darauf folgenden Wochen, in denen sich die Erkrankungen häuften, entpuppten sich für die chinesische »Batwoman« als unvorstellbarer Stress. Obwohl sie sich eigentlich 16 Jahre lang darauf vorbereitet hatte, empfand sie diese Zeit als die anstrengendste ihres Lebens. Mit Hilfe der Polymerase-Kettenreaktion, bei der DNA-Stränge wieder und wieder kopiert werden, konnten die Forscher bei zahlreichen Patienten Gensequenzen nachweisen, die für Coronaviren typisch sind.

Shi wies ihr Team an, die Tests zu wiederholen. Außerdem schickte sie Proben an ein anderes Labor. Dort sollte das vollständige Genom des Virus sequenziert werden. Derweil überprüfte die Virologin fieberhaft die Daten der vergangenen Jahre aus ihrem eigenen Labor, um herauszufinden, ob Versuchsmaterial irgendwann einmal falsch gehandhabt oder entsorgt wurde. Sie war erleichtert, als sie herausfand: Keine der neuen Gensequenzen stimmte mit dem Erbgut solcher Viren überein, die ihr Team aus Fledermaushöhlen entnommen hatte. »Da ist mir wirklich ein Stein vom Herzen gefallen«, sagt sie. »Ich hatte seit Tagen kein Auge zugetan.« Ihre Befürchtung, die Viren seien auf Grund einer Unachtsamkeit aus ihrem Labor entkommen, hatte sich zum Glück nicht bewahrheitet.

Am 7. Januar 2020 stellte das Wuhan-Team fest: Das neue Virus hatte tatsächlich die Krankheit verursacht, an der die beiden Patienten litten. Dabei stützen sich die Forscher auf die Ergebnisse der Polymerase-Kettenreaktion, der vollständigen Genomsequenzierung und der Antikörpertests von Blutproben. Zudem hatte sich der Erreger unter Laborbedingungen als infektiös für menschliche Lungenzellen erwiesen. Das Genom des Virus, das auf Grund seiner Verwandtschaft mit dem Sars-Keim den Namen Sars-CoV-2 bekam, stimmt zu 96 Prozent mit dem Erbgut eines Coronavirus überein, welches die Virologen bei Hufeisennasen in Yunnan identifiziert hatten. »Es ist völlig klar, dass wieder einmal Fledermäuse das natürliche Reservoir bilden«, sagt Daszak, der an den letztgenannten Arbeiten nicht beteiligt war.

Das Virus hatte sich seit Ende Dezember kaum verändert. Das ergab eine Analyse von 326 veröffentlichten Virensequenzen, die man Patienten entnommen hatte und die sich untereinander stark ähnelten. »Vermutlich haben die Erreger

einen gemeinsamen Vorfahren«, sagt Baric. Demnach wäre der Keim nur ein einziges Mal auf den Menschen übersprungen und wanderte in der Folge nur noch von Mensch zu Mensch.

Die Wissenschaftler spekulieren, der Erreger habe schon Wochen oder sogar Monate zirkuliert, bevor die ersten schweren Fälle auftraten. Er sei nämlich ziemlich stabil, und viele Infizierte hätten offenbar nur leichte Symptome. »Es könnte diverse Miniausbrüche gegeben haben, die immer wieder verebten«, vermutet Baric. Doch irgendwann entwickelte sich daraus eine große Infektionswelle: »Der Ausbruch von Wuhan war kein Zufall.«

### **Eine Serie von Infektionskrankheiten, die in Fledertieren ihren Anfang nahmen**

Der Epidemie, die in Wuhan ihren Anfang nahm, ist die sechste einer Serie von Infektionskrankheiten, die von Fledermausviren verursacht wurden – nach Hendra 1994, Nipah 1998, Sars 2002, Mers 2012 und Ebola 2014. »Die Tiere selbst sind aber nicht das Problem«, betont Linfa Wang. Fledermäuse stützten die biologische Vielfalt und hielten Ökosysteme aufrecht, indem sie Insekten fressen und Pflanzen bestäuben. »Problematisch wird es, wenn wir mit ihnen in Kontakt kommen.«

Inzwischen sind zweieinhalb Monate seit Ausbruch der Epidemie vergangen. Vor acht Wochen noch stellte die chinesische Regierung die elf Millionen Einwohner von Wuhan unter massenhafte Quarantäne. Verglichen damit würde sich das Leben jetzt fast wieder normal anfühlen, sagt Shi. »Vielleicht gewöhnen wir uns langsam daran. Die schlimmsten Tage scheinen vorüber zu sein.« Die Mitarbeiter des Instituts hatten einen speziellen Pass, um von zu Hause aus zu ihrem Labor fahren zu können. Doch sie konnten nirgendwo anders hingehen. Mehr als einen Monat lang ernährten sie sich während langer Laborschichten von Instantnudeln, weil die Kantine des Instituts geschlossen hatte.

Wie die Forscher herausfanden, nutzt das neue Coronavirus das Angiotensin konvertierende Enzym 2 (ACE2) als Rezeptor, um in menschliche Lungenzellen einzudringen. Shis Team forscht nach Medikamenten, die den Vorgang blockieren könnten. Wie andere Forschergruppen auch sucht es zudem nach Impfstoffen. Langfristig will die Gruppe Breitbandimpfstoffe und Medikamente gegen solche Coronaviren entwickeln, die als gefährlich für den Menschen gelten. »Der Ausbruch von Wuhan ist ein Weckruf«, betont Shi.

Viele Wissenschaftler sind plädieren dafür, dass wir nicht erst dann auf tödliche Krankheitserreger reagieren dürfen, wenn es zu einem Ausbruch kommt, sondern schon zuvor aktiv nach ihnen suchen müssen. »Der beste Weg ist die Prävention«, sagt Daszak. 70 Prozent der durch Tiere übertragenen, neu auftretenden Infektionskrankheiten stammen von wilden Tieren. »Wir sollten also all diese Viren weltweit finden und bessere diagnostische Tests entwickeln«, fügt der Krankheitsökologe hinzu. Das würde bedeuten, dass sehr viel mehr Wissenschaftler solchen Forschungen nachgehen müssen. Die Arbeiten sollten sich auf Hochrisiko-Virusgruppen bei solchen Säugetieren konzentrieren, die

für Coronavirusinfektionen anfällig sind, wie Fledermäuse, Nagetiere, Dachse, Zibetkatzen, Schuppentiere und nicht-menschliche Primaten, meint Daszak. Seines Erachtens verläuft die vorderste Front im Kampf gegen die Erreger in den Entwicklungsländern tropischer Klimazonen, weil dort die Vielfalt der Wildtiere am größten ist.

In den zurückliegenden Jahrzehnten haben Daszak und seine Kollegen etwa 500 menschliche Infektionskrankheiten aus dem vergangenen Jahrhundert analysiert. Ihr Ergebnis: Neue Krankheitserreger treten tendenziell an solchen Orten auf, an denen die Bevölkerung eng zusammenlebt und die natürliche Landschaft verändert wird – durch Straßen, Bergbau, Waldrodungen und intensive Landwirtschaft. »China ist nicht der einzige Hotspot«, nimmt Daszak an. Schwellenländer wie Indien, Nigeria und Brasilien seien ebenfalls stark gefährdet.

Sobald irgendwo ein potenzieller Krankheitserreger entdeckt wurde, sollten die Wissenschaftler und Gesundheitsbehörden regelmäßig testen, ob es zu Infektionen gekommen ist. Es sollten dafür Blutproben und Abstriche von Nutztieren, gezüchteten Wildtieren und Menschen genommen werden, vor allem von Hochrisikogruppen wie Landwirten, Bergarbeitern und Dorfbewohnern nahe Fledermauskolonien sowie von Menschen, die Umgang mit Wildtieren haben, empfiehlt US-Virologe Gregory Gray. Mit diesem Ansatz, der unter dem Namen »One Health« bekannt ist, soll einheitlich die Gesundheit von Wildtier, Haus- und Nutztier sowie des Menschen kontrolliert werden. »Nur so können wir einen Ausbruch eindämmen, bevor er zur Epidemie auswächst«, sagt Gray. Mit dieser Vorgehensweise ließen sich möglicherweise auch hunderte Milliarden Dollar sparen, die eine solche Epidemie kosten kann.

Chinas »Batwoman« hingegen hat dem Entschluss gefasst, nicht mehr persönlich auf Virenjagd zu gehen. »Aber der Einsatz muss weiterlaufen«, sagt Shi, die weiterhin einschlägige Forschungsprogramme leiten wird. »Was wir entdeckt haben, ist nur die Spitze des Eisbergs.« Daszaks Team schätzt, dass weltweit bis zu 5000 Coronavirenstämme in Fledermäusen schlummern. Shi will dazu ein nationales Projekt gründen, um systematisch Virenproben aus Fledermaushöhlen zu gewinnen – in viel größerem Umfang, als es ihrem Team bislang möglich war. »Coronaviren, die in Fledermäusen zirkulieren, werden weitere Ausbrüche verursachen«, davon ist Shi Zhengli überzeugt. »Wir müssen sie finden, bevor sie uns finden.« ◀

#### QUELLEN

**Anthony, S. J.:** Global patterns in coronavirus diversity. *Virus Evolution* 3, 2017

**Zhengli, S. et al.:** Discovery of a rich gene pool of bat SARS-related coronaviruses provides new insights into the origin of SARS coronavirus. *PLOS Pathogens* 13, e1006698, 2017

**Zhengli, S. et al.:** Isolation and characterization of a bat SARS-like coronavirus that uses the ACE2 receptor. *Nature* 503, 2013

**Zhengli, S. et al.:** Serological evidence of bat SARS-related coronavirus infection in humans, China. *Virology Sinica* 33, 2018

**Zhengli, S. et al.:** A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin. *Nature* 579, 2020

# PRIMATENARCHÄOLOGIE DIE ANDEREN WERKZEUGBAUER

**Ausgegrabene Steinwerkzeuge, die einst Affen hinterlassen haben, verraten einiges über die Ursprünge des technischen Fortschritts. Damit gehen archäologische Methoden inzwischen über die Erforschung der menschlichen Vergangenheit hinaus.**





**Michael Haslam** war Archäologe an der britischen University of Oxford und lebt jetzt als unabhängiger Wissenschaftler in London. Seine Forschungen konzentrieren sich auf die Evolution der Technologien bei Mensch und Tier.

» [spektrum.de/artikel/1714780](https://spektrum.de/artikel/1714780)

Die Flut steigt schnell, aber den Affen scheint das nichts auszumachen. Manche zanken sich, andere räkeln sich auf den Felsen und kauen in aller Ruhe an einer Auster, wieder andere genießen es, sanft gekrault zu werden. Die jüngeren unter ihnen machen sich einen Spaß daraus, vom Ast eines Baums hinunter in das warme, klare Meerwasser zu springen. Wie alle Tiere, die an diesem thailändischen Küstenabschnitt zu Hause sind, leben auch sie im Einklang mit dem täglichen Rhythmus der Gezeiten.

Ich dagegen mache mir durchaus Sorgen wegen des steigenden Wassers. An diesem warmen Dezembertag im Jahr 2013 kauere ich am Strand neben einem sauber ausgehobenen, quadratischen Loch und strecke den Arm so tief wie möglich hinunter, um eine weitere Schaufel voll feuchtem Sand heraufzuholen. Das Loch ist nur einen halben Meter breit, aber ich habe Stunden gebraucht, um es nach dem Rückgang der nächtlichen Flut zu graben. Eine einzige achtlose Bewegung – und alles stürzt ein. Hektik wäre also kontraproduktiv.

Es handelt sich hier um eine archäologische Ausgrabung, und die sieht ganz so aus, wie man sie sich vorstellt: Überall liegen Eimer, Siebe, Schnüre, Wasserwaagen, Sammelbeutel und Maßbänder verstreut. Doch die uralten

**Javaneraffen benutzen an einem thailändischen Strand Steine, um Muscheln zu knacken.**



Objekte, die mich auf die kleine Insel Piak Nam Yai im Nationalpark Laem Son gelockt haben, sind keine typischen archäologischen Fundstücke. Ich suche weder nach Münzen oder Keramik noch nach Überresten einer ehemaligen Siedlung oder einer längst untergegangenen Kultur der Menschheit. Mir geht es vielmehr um verflissene Spuren jener Affenkultur, die weiter oben am Strand nicht zu übersehen ist.

Ich bin – zumindest vorübergehend – Primatenarchäologe: Mit traditionellen archäologischen Methoden möchte ich mehr über das frühere Verhalten verschiedener Primatenarten herausfinden. Dabei komme ich mir ein wenig vor wie Dr. Cornelius: jener Schimpanse aus dem Science-fiction-Klassiker »Planet der Affen«, der umstrittene Belege ans Licht bringt, wonach Menschen nicht immer stumme Kreaturen waren. Wegen seiner Entdeckung wirft man ihm Ketzerei vor; und auch wenn es der Film so nicht erzählt, hege ich doch den Verdacht, dass ihm Forschungsgelder gestrichen werden.

Seit mehr als 150 Jahren steht der Begriff Archäologie ausschließlich für die wissenschaftliche Erforschung von Überresten, die aus der Vergangenheit des Menschen stammen. Es entstand eine Fülle an Unterdisziplinen, die sich bestimmten Zeiträumen, Orten oder Methoden widmeten, aber alle hatten nur ein zentrales Thema: den Menschen. Tiere kamen in archäologischen Untersuchungen zwar vor, jedoch lediglich als Nahrung, Transportmittel, Hausgenossen oder Parasiten. Sie umkreisten die Welt des Menschen.

Mit dieser Ausrichtung gewann man zweifelsohne außergewöhnliche Erkenntnisse. So verschob sich 2015 die Grenze für unsere Kenntnisse über menschliches Verhalten weit in die Vergangenheit, als Sonia Harmand von der Stony Brook University und ihre Kollegen Steinwerkzeuge entdeckten, die ein entfernter Vorfahre vor mehr als drei Millionen Jahre an der Fundstätte Lomekwi in Kenia hinterlassen hatte. Übrigens ist es kein Zufall, dass diese Fundstücke aus Stein bestehen. Während des größten Teils der vielen Millionen Jahre, über die wir etwas wissen, bildeten Steinwerkzeuge die einzigen kulturellen Artefakte, die

## Jane Goodall veränderte ein für alle Mal unser Bild vom Schimpansen

erhalten geblieben sind und daher als Leitfaden für die Deutung unserer Ursprünge taugen. Etwaige Objekte aus vergänglicheren Materialien sind dagegen längst verschwunden.

Die Primatenarchäologie rückt unsere engsten evolutionären Verwandten – die Klein- und die Menschenaffen – ins Rampenlicht und schafft damit einen größeren Rahmen, in dem wir die lange Entwicklungsgeschichte menschlicher Technologien besser verstehen können. Der Mensch und seine unmittelbaren Vorfahren gehören natürlich ebenfalls zu den Primaten, und nach wie vor bleibt es ein zentrales Anliegen solcher Forschungsarbeiten, Licht auf unseren eigenen Evolutionsweg zu werfen. Wenn wir den überraschend komplexen technologischen Aufstieg des Menschen in einen größeren biologischen Zusammenhang stellen, gewinnen wir ein besseres Verständnis dafür, welche Aspekte sich aus unserem gemeinsamen Erbe als Primaten ableiten und welche für uns einzigartig sind.

### Eine erfindungsreiche Spezies

Ein Grund, warum sich Archäologen ausschließlich auf menschliche Kulturen konzentrieren, liegt zum großen Teil darin, dass Wissenschaftler lange davon überzeugt waren, nur Menschen könnten Werkzeuge herstellen und benutzen. Dass das nicht stimmt, wies die Primatenforscherin Jane Goodall erstmals in den 1960er Jahren nach. Der Anthropologe Louis Leakey (1903–1972) hatte an den Ufern ostafrikanischer Seen verschiedene menschliche Fossilien und Steinwerkzeuge entdeckt und wollte nun wissen, womit sich die Homininen dort möglicherweise beschäftigt hatten. Leakey schickte Goodall zum Ostufer des Tanganjikasees in Tansania in den Gombe-Stream-Nationalpark, wie er heute heißt, damit sie dort das Verhalten von Schimpansen beobachten konnte. Ihre Entdeckung, dass auch Schimpansen Werkzeuge herstellen, um sich damit Nahrung zu verschaffen, veränderte ein für alle Mal unser Bild von den Fähigkeiten der Primaten. Allerdings verwenden die Ostafrikanischen Schimpansen von Gombe (*Pan troglodytes schweinfurthii*) ausschließlich pflanzliche Teile, die sich im tropischen Klima binnen weniger Wochen zersetzen. Die Erhaltungsdauer der Objekte unterscheidet sich somit krass: auf der einen Seite Jahrmillionen alte Steinwerkzeuge, die Leakey in Hülle und Fülle entdeckt hatte, auf der anderen die von Goodall gefundenen Stöckchen.

Glücklicherweise sind Schimpansen eine erfindungsreiche Spezies, und in den 1970er Jahren entdeckten Wissenschaftler, dass mehrere Gruppen des Westafrikanischen Schimpansen *Pan troglodytes verus* mit Steinen Nüsse knacken. Genetische Befunde lassen darauf schließen, dass sich diese Unterart von der zentralen Population vor viel-

## AUF EINEN BLICK TIERISCHE ARCHÄOLOGIE

- 1 Traditionell beschäftigt sich die Archäologie mit der Vergangenheit des Menschen. Aber auch Tiere hinterlassen Werkzeuge, die sie selbst benutzt haben.
- 2 Wissenschaftler graben daher mit archäologischen Methoden Objekte aus, die von Affen oder auch von anderen Tieren stammen, um so etwas über deren Evolution herauszufinden.
- 3 Die Erkenntnisse der Primatenarchäologen erhellen ebenfalls, wie sich der technologische Fortschritt bei unseren eigenen Vorfahren abgespielt haben könnte.

leicht einer halben Million Jahre abgespalten hat. Da weder Schimpansen in Zentral- und Ostafrika (so auch in Gombe) noch ihre Schwesterspezies, die Bonobos (*Pan paniscus*), Steinwerkzeuge kennen, sieht es so aus, als hätte die Population im Westen irgendwann eigenständig diesen Werkzeuggebrauch erfunden.

Die Entdeckung warf entscheidende Fragen nach den Ursprüngen von Steinwerkzeugen auf. Unser gemeinsamer Vorfahre stellte seine Gerätschaften vermutlich wie die Schimpansen und Bonobos oder auch wie Orang-Utans und Gorillas aus Pflanzen her. Doch warum setzen nur so wenige Vertreter unserer tierischen Verwandtschaft auf Stein als Material? Wilde Schimpansen finden hierfür nur sehr begrenzte Verwendung – hauptsächlich dann, wenn die mechanischen Vorteile beim Aufschlagen einer harten Nusschale zum Tragen kommen. Menschen dagegen nutzten Steine für alles Mögliche, von Schneidegerätschaften bis zu Speerspitzen, vom Schmuck bis zu den Pyramiden Ägyptens und Mittelamerikas. Weshalb unterscheiden sich die technischen Entwicklungswege von Schimpansen und Menschen so stark?

Da wir nur zwei Beispiele für unabhängig voneinander aufgetretene Steinwerkzeug-Technologien kennen, lassen sich ihre Entstehungsschritte schwer nachzeichnen. Wir können nicht einfach das Verhalten einer Untergruppe von Schimpansen auf unsere frühen Vorfahren übertragen und argumentieren, die menschliche Technologie sei aus dem Nüsseknacken mit Steinen entstanden. Das wäre ebenso abwegig, wie aus dem Verhalten einer Untergruppe heutiger Menschen auf die Vorfahren der Schimpansen zu schließen.

Eines der Hauptprobleme besteht darin, dass wir praktisch keine Belege für die Evolution der Schimpansen besitzen. Mittlerweile weisen DNA-Analysen darauf hin, dass Mensch und Schimpanse sich vor ungefähr sieben Millionen Jahren von einem gemeinsamen Vorfahren auseinanderentwickelt haben. Als einzige Fossilien von Schimpansen kennen wir aber nur drei Zähne, die auf ein Alter von rund einer halben Million Jahren datiert wurden. Und die frühesten bekannten Werkzeuge von Schimpansen sind kaum mehr als 4000 Jahre alt. Deshalb stecken wir mit unseren Erkenntnissen über unsere Menschenaffenvervettern gewissermaßen in einer ewigen Gegenwart fest, mit Beobachtungen, die fast ausschließlich aus den letzten Jahrzehnten stammen. Würden wir Menschen nach dem gleichen kurzen Zeitrahmen beurteilen, besäßen wir nur sehr spärliche Kenntnisse über die Entstehung unserer Technologien und ihren Wandel im Lauf der Zeit. Angenommen, wir müssten raten: Böten Essstäbchen oder Besteck den besten Hinweis auf die Essgewohnheiten unserer Vorfahren? Ist eine Playstation oder eine Xbox die primitivere Variante eines Spielzeugs? Solche Fragen mögen absurd klingen, Wissenschaftler denken jedoch häufig nicht darüber nach, ob Schimpansen der Vergangenheit sich auch nur annähernd so verhielten, wie wir es heute beobachten. Waren sie technologisch weniger versiert? Oder konnten sie es besser?

Problematisch ist ebenfalls, dass ein Vergleich zwischen zwei Alternativen nur wenige Anhaltspunkte für die Frage

liefert, aus welchem Grund sich bestimmte Merkmale in der einen Abstammungslinie entwickelt haben und in der anderen nicht. Der englische Naturforscher John Lubbock (1834–1913), der die Begriffe Paläolithikum und Neolithikum für verschiedene Abschnitte der Steinzeit prägte, äußerte schon in den 1860er Jahren die Vermutung, aus dem Nüsseknacken der Primaten könnte sich die menschliche Fähigkeit entwickelt haben, Steine gegeneinanderzuschlagen, um so scharfkantige Stücke als Schneidwerkzeuge abzusplintern. Doch wenn dem so wäre, warum machen das heutige Schimpansen nicht? Mangelt es ihnen an Fantasie, Zeit oder Gelegenheit? Wir brauchen ein viel breiteres Spektrum von Fallstudien, mit denen sich Hypothesen über technologische Entwicklungen überprüfen lassen. Hierbei kommen uns die Kleinaffen zu Hilfe, mit denen ich mich beschäftige.

### **Auch Javaneraffen sind versierte Werkzeugbauer**

Am Strand in Thailand füllt sich das Loch langsam mit Wasser. Dieses sickert seitlich ein und droht die Wände der Grube noch stärker zu untergraben und zu destabilisieren. Mit einer an eine Autobatterie angeschlossenen Bootspumpe versuche ich, den Wasserstand niedrig zu halten, aber irgendwann gebe ich auf. Schließlich, als die Wellen bereits meine Zehen umspielen, hole ich vorsichtig eine Reihe kleiner Vulkangesteinsbrocken ans Licht, die auf ihrer rauen

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ISTOCK / JOEFCIGAK

Oberfläche charakteristische Kratzer und Vertiefungen tragen.

Wie wir von der thailändischen Primatenforscherin Suchinda Malaivijitnond von der Chulalongkorn-Universität in Bangkok und ihrem Kollegen Michael Gumert von der Nanyang Technological University in Singapur seit mehr als zehn Jahren wissen, benutzen Javaneraffen der Unterart *Macaca fascicularis aurea* auf Piak Nam Yai und anderen Inseln der Andamanensee regelmäßig Steinwerkzeuge. Das Verhalten lässt sich von Nordthailand bis nach Myanmar beobachten, wo es bereits in den 1880er Jahren vom britischen Kapitän Alfred Carpenter (1847–1925) beschrieben wurde. Doch sein Bericht blieb weitgehend unbeachtet; erst als man Anfang 2005 die Auswirkungen des verheerenden Tsunamis von 2004 erfasste, wurde der Werkzeuggebrauch der Makaken wiederentdeckt.

Ähnliche Beobachtungen aus dem 19. Jahrhundert bis heute lassen darauf schließen, dass der Gebrauch von Steinen bei Javaneraffen tief verwurzelt ist. Sobald die Ebbe einsetzt, kommen die Tiere aus den Wäldern im Inneren ihrer Insel ans Meer. Sie suchen sich unter den am Strand

liegenden Steinen etwa handgroße Brocken aus, schlagen damit auf die jetzt zugänglichen Austern ein und entfernen die obere Schalenhälfte. In der Regel brauchen sie nur fünf oder sechs Schläge, um eine Muschel zu öffnen, und sie nehmen immer wieder dasselbe Werkzeug dafür. In Extremfällen knacken die Affen mit einem solchen Steinhammer mehr als 60 Austern hintereinander.

Austern sind nicht die einzige Nahrung, bei der die Javaneraffen auf ein Werkzeug angewiesen sind. Die Gezeitenzonen bieten einen reich gedeckten Tisch, und so halten die Makaken ebenfalls nach Schnecken oder Krebsen Ausschau. Im Gegensatz zu den Muscheln können diese Beutetiere weglaufen, also heben die Affen sie auf und bringen sie zu einem flachen Felsen in der Nähe. Dort nehmen sie dann einen viel größeren Stein – der durchaus mehrere Kilogramm wiegen kann – und zerschmettern damit ihre Beute auf dem flachen Felsen, der als Amboss dient. Wenn die Gruppe sich ihrem Festmahl widmet, hört man es ständig knacken und kratzen.

Nach einem solchen Raubzug ist die Küste bei Ebbe von zerbrochenen Schalen und Schlagsteinen übersät. Die Affen wählen ihre Werkzeuge mit Bedacht: Mit den spitzen Enden kleiner Steine treffen sie die Austern genau an der richtigen Stelle, und Schnecken schlagen sie mit dem Mittelstück größerer Brocken auf. Dadurch werden die Werkzeuge in charakteristischer Weise beschädigt. Diese Abnutzung ist leicht von natürlich entstandenen Schrammen und Ritzen zu unterscheiden, so dass sich daraus die Verwendung eines Affenwerkzeugs und damit das mutmaßliche Beutetier ableiten lässt. Genau nach solchen typischen Gebrauchsspuren suche ich bei meinen Grabungen am Strand. Die kleinen Vulkansteine, die ich bei Ebbe geborgen habe, tragen Spuren der Austernverarbeitung. Auch wenn diese Artefakte den Nachweis für die Werkzeugbenutzung durch Javaneraffen nicht weit in die Vergangenheit schieben – die frühesten Exemplare sind lediglich 65 Jahre alt –, handelt es sich doch um die ersten

## Stellten unsere Vorfahren scharfkantige Steinsplitter erst zufällig her, bevor sie damit Dinge zerschnitten?

Werkzeuge von Kleinaffen, die jemals bei archäologischen Ausgrabungen gefunden wurden.

Javaneraffen sind nicht die einzigen Kleinaffen, die archäologische Spuren hinterlassen haben. Im Jahr 2014 stehe ich abermals an einem quadratischen Loch, doch dieses Mal lindert keine Meeresbrise die Hitze. Ich befinde mich im Nationalpark Serra da Capivara im trockenen Nordosten Brasiliens mit seinen von kargen Büschen durchsetzten Felsformationen. Während unserer Ausgrabungen droht glücklicherweise keine Flut, sondern es krabbelt nur hin und wieder ein Skorpion oder eine Spinne davon.

Wir sind hier, weil sich die einheimischen Rückenstreifen-Kapuziner (*Sapajus libidinosus*) als wahre Technikmeister erwiesen haben. 2004 beschrieben Forscher um die Primatologin Dorothy Fragaszy von der University of Georgia, wie Kapuzineraffen in einem ähnlichen, rund 300 Kilometer entfernten Lebensraum Steinwerkzeuge verwendeten. Wie wir inzwischen wissen, suchen sich Kapuzineraffen an verschiedenen Orten Brasiliens schwere Steine aus, um damit die harten Schalen von Nüssen und Früchten aufzubrechen, ganz so, wie das auch die Schimpansen in Westafrika tun. Die Kapuziner der Serra da Capivara zeigen sich allerdings besonders kreativ. Sie knacken nicht nur Nüsse, sondern graben auch mit Steinen nach Wurzeln und Spinnen. Und noch eine weitere Parallele zu den Menschenaffen gibt es: Die Kapuziner brechen gezielt Zweige ab, beißen sie auf die richtige Größe herunter und streifen die Blätter ab, um dann mit diesen Stöckchen schwer greifbare Beutetiere wie Eidechsen, die sich in Felsspalten verstecken, zu erwischen.

### Die ältesten Artefakte außerhalb Afrikas, die nicht von Menschen stammen

Bei unseren Ausgrabungen richtet sich unser Fokus insbesondere auf eine Nahrungsquelle: Aus dieser Region Brasiliens stammt der inzwischen weltweit angebaute Cashewbaum. Seine Nüsse sind nahrhaft und wohlschmeckend, aber die Schalen enthalten eine ätzende Flüssigkeit, die auf der Haut schmerzhaft brennt. Deshalb brechen die Kapuzineraffen die Nüsse mit schweren Hammersteinen auf. Das funktioniert ganz gut, und zu unserem Glück bleiben dabei an den Werkzeugen aufschlussreiche Schlagspuren sowie die dunkle Flüssigkeit der Nussschalen zurück. Kartieren wir die Fundorte solcher Steine, die sich im Lauf der Jahre angesammelt haben, dann können wir im Wald die Stellen ausfindig machen, die von den Affen am intensivsten genutzt wurden. Da sich die Boden-, Feuchtigkeits- und Lichtverhältnisse, die das Wachstum von Cashewbäumen begünstigen, während der letzten Jahrtausende kaum verändert haben, gehen wir davon aus, dass die Stellen, an denen die Affen heute häufig anzutreffen sind, wohl auch in der Vergangenheit von ihnen aufgesucht wurden.

Unsere Ausgrabungen an ausgewählten Stellen bestätigten die Vermutung. Wie wir anhand etlicher Hammersteine und Ambosse mit eindeutigen Gebrauchsspuren feststellten, hatten die Affen in mindestens vier abgegrenzten Zeiträumen Werkzeuge verwendet. Diese stammen sicher von Kapuzineraffen, denn wir stießen auf keinerlei Anzeichen menschlicher Aktivität – weder auf Spuren von Feuer noch auf Keramik oder auf irgendwelche Steinwerkzeuge, die bekanntermaßen von Menschen hergestellt wurden.

Die untersten Schichten mit Werkzeugen von Kapuzineraffen lassen sich auf ein Alter von 2000 bis 3000 Jahren datieren. Damit stellen diese Gerätschaften die ältesten bekannten Artefakte außerhalb Afrikas dar, die nicht von Menschen stammen. Sie spiegeln das Verhalten von Affen wider, die lange vor der europäischen Invasion in Amerika lebten. Wir fanden keine Anhaltspunkte für den Gebrauch von Werkzeugen aus Pflanzenmaterial. Doch auch hier gilt: Steine bleiben wesentlich besser erhalten als Stöcke.



MICHAEL HASLAM

**Ein Rückenstreifen-Kapuziner öffnet mit Hammer und Amboss eine Cashewnuss (oben). Die Werkzeuge zeigen danach charakteristische Abnutzungsspuren (rechts).**

Unsere Forschungen in der Serra da Capivara warteten mit einer zusätzlichen Überraschung auf. Während der Feldstudie filmte ich, wie Kapuzineraffen mit ihren Hammersteinen Felsblöcke zerschlugen. Offenbar wollten sie den dadurch erzeugten Quarzstaub ergattern, den sie dann aufleckten oder durch die Nase einsogen. Andere Wissenschaftler hatten das gleiche Verhalten ebenfalls beobachtet, aber als ich die zerbrochenen Steinbrocken einsammelte und rund um die Stelle weitere Ausgrabungen vornahm, bemerkte ich etwas, was kein früherer Bericht angesprochen hatte: Die Gesteinssplitter der Kapuzineraffen ähnelten unverkennbar den abgeschlagenen Steinen, die man von manchen Fundstätten von Menschenvorfahren kennt. Tomos Proffitt, damals einer meiner Postdocs an der University of Oxford, gelang mit detaillierten Analysen der erstmalige Nachweis, dass nichtmenschliche Primaten absichtlich Steine zerbrochen und scharfkantige Splitter hinterlassen hatten.

Zur Klarstellung: Bisher wurde nicht beobachtet, dass Kapuzineraffen die von ihnen hergestellten scharfkantigen Splitter auch benutzen. Dieses Verhalten scheint nach derzeitigem Kenntnisstand dem Menschen vorbehalten zu sein. Wenn aber Steinabschläge unbeabsichtigte Nebenprodukte einer bislang unbeachteten Tätigkeit darstellen – nämlich der Herstellung von Staub zum Verzehr –, wirft der Befund auch weiter reichende Fragen für manche archäologischen Funde von Frühmenschen auf. Bisher gingen Archäologen davon aus, Frühmenschen hätten Steine zerschlagen, um scharfe Splitter zu einem bestimmten Zweck zu erzeugen, beispielsweise um Fleisch zu schneiden. Vor dem Hintergrund unserer Beobachtungen an Kapuzineraffen müssen wir uns jedoch fragen, ob unsere



MICHAEL HASLAM

Vorfahren vor drei Millionen Jahren vielleicht genauso wenig an den von ihnen hergestellten scharfkantigen Steinen interessiert waren. Stellten auch sie die Splitter erst nur zufällig her, bevor sie auf die Idee kamen, sie in die Hand zu nehmen und Dinge zu zerschneiden? Wir wissen es nicht. Mittlerweile müssen wir aber die Möglichkeit zumindest in Betracht ziehen. Ein bewährter Herstellungsprozess für ein Objekt könnte demnach den Keim für etwas Neues gelegt haben: Scharfkantiger Abfall wurde zu einem wertvollen Hilfsmittel.

Welche Erkenntnis wir aus den Funden in Brasilien und Thailand über unsere eigene technologische Evolution auch ziehen, eines kristallisiert sich jetzt schon heraus: Wir verfügen inzwischen über archäologische Befunde von drei nichtmenschlichen Primatenarten. Es lohnt sich, hier einen Augenblick innezuhalten und diese Tatsache genauer zu betrachten. Erst seit einem Jahrzehnt wissen wir überhaupt, dass es wilde Kleinaffen gibt, die Steinwerkzeuge herstellen. Wir fangen gerade erst an, solche Verhaltensweisen bis in die ferne Vergangenheit zurückzuverfolgen. Lediglich ein Viertel aller bekannten archäologischen Befunde von Primaten stammt von der Entwicklungslinie des

Menschen – allerdings gelten diese als der mit Abstand am besten untersuchte Anteil.

Wie meine Kollegen und ich vermuten, neigt sich die anthropozentrische Archäologie ihrem Ende zu; in Zukunft wird das Fach alle vergangenen Verhaltensweisen betrachten. Manche Fachleute teilen vielleicht nicht meine Überzeugung, dass es sich bei der Archäologie lediglich um eine Methode handelt, die sich nicht auf den Menschen beschränkt, sondern für jedes Tier angewendet werden kann, das dauerhafte materielle Spuren hinterlässt. Die Arbeiten der wenigen Primatenarchäologen offenbarten neue Sichtweisen sowohl auf unseren eigenen Evolutionsweg als auch auf den anderer Arten. Technologie, also die erlernte materielle Kultur, ist keineswegs rein menschlich. Für ihre Entwicklung braucht sie weder Sprache noch menschliche Lehrer oder menschliche Formen der Kooperation, ja noch nicht einmal ein großes Gehirn: Das eines ausgewachsenen

## Die anthropozentrische Archäologie neigt sich ihrem Ende zu

Kapuziner- oder Javaneraffen erreicht nur fünf Prozent der Größe des menschlichen Denkgorgans.

Offensichtlich entwickelte sich die Benutzung von Steinwerkzeugen während der Evolution der Primaten erst vor relativ kurzer Zeit mindestens viermal unabhängig voneinander: an den Küsten (Javaneraffen), an Seen (Menschen), in Wäldern (Schimpansen) und in halbtrockenen Landschaften (Kapuzineraffen). Diese Vielfalt lässt darauf schließen, dass das gleiche Verhalten in der Vergangenheit bei vielen Primaten immer wieder auftauchte, auch wenn es inzwischen verschwunden ist. Das Spannende dabei: Wenn das Szenario stimmt, sind die von diesen Gruppen verwendeten Steinwerkzeuge immer noch da und harren ihrer Entdeckung.

### Es ist an der Zeit, das nächste Loch zu graben

Wir sollten uns nicht einmal auf Primaten beschränken. Zusammen mit der Verhaltensforscherin Natalie Uomini vom Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in Jena und anderen Kollegen führte ich in den letzten Jahren an der Westküste der Vereinigten Staaten archäologische Untersuchungen an Seeottern (*Enhydra lutris*) durch, die ebenfalls Werkzeuge benutzen. Wie wir dabei beobachteten, kommen die Meerestiere immer wieder zu bestimmten Lieblingsplätzen an der Küste zurück, um dort Muscheln zu knacken. Dabei hinterlassen sie behauene Steine sowie große Haufen weggeworfener Muschelschalen, die man leicht mit Abfallhaufen prähistorischer Menschen verwechseln könnte. Die Rückkopplung zwischen den dadurch entstehenden Landmarken und ihrer Anziehungskraft auf junge Tiere, die den Werkzeuggebrauch erlernen, dürfte bei den Seeottern ähnlich entscheidend für deren technologi-

sche Tradition sein wie die Beziehung zwischen produktiven Cashewbäumen und den Rückenstreifen-Kapuzinern.

Uomini und ich beschäftigten uns auch mit der Archäologie der Geradschnabelkrähen (*Corvus moneduloides*), deren kognitive Fähigkeiten und raffinierter Werkzeuggebrauch berühmt sind. Hierfür nutzen sie regelmäßig bestimmte Objekte, die sie vor Ort finden. Bleiben die Werkzeugmaterialien erhalten, dann verfügen wir über alle notwendigen Zutaten für archäologische Fundstätten, mit denen wir das Verhalten der Tiere rekonstruieren können. Archäologie ist vom Ansatz her interdisziplinär, und dass sich zu ihren Forschungsfeldern nun auch der Werkzeuggebrauch durch vorzeitliche Tiere gesellt, leuchtet intuitiv ein.

Zufällig fiel der Aufschwung der Primatenarchäologie mit dem Erscheinen neuer Episoden aus der Filmreihe »Planet der Affen« zusammen. Darin entwickeln unsere Menschenaffenverwandten eine primitive Technologie, die aber schnell alles übertrifft, was wir in Wirklichkeit von Wildtieren kennen. Bereits ein simpler Speer, bei dem eine scharfe Spitze auf einem davon getrennten Schaft sitzt, erfordert einen kognitiven Sprung, der bei den Werkzeugen heutiger wilder Menschenaffen ganz offensichtlich fehlt. In den Filmen nutzen die Affen außerdem Feuer und schmücken sich – auch für diese Verhaltensweisen gibt es in der Natur außerhalb der menschlichen Abstammungslinie keine eindeutigen Belege.

Dennoch erscheint der technische Fortschritt der Hollywood-Affen nicht vollständig an den Haaren herbeigezogen. Er ist sogar plausibel. Westafrikanische Schimpansen stellen einfache, aus einem Stück gefertigte Speere her und erbeuten damit kleinere Primaten; ähnlich machen es Kapuzineraffen mit Eidechsen. William McGrew von der schottischen University of St Andrews, der kompetenteste Kenner für Werkzeuggebrauch bei Schimpansen und einer der ersten Fürsprecher der Primatenarchäologie, beobachtete einmal einen ostafrikanischen Schimpansen, der ein »Halsband« aus verknoteter Kleinaffenhaut trug. Was mag man zukünftig noch bei diesen Tieren alles entdecken?

Die Archäologie des Menschen hat sich – dank tausender Wissenschaftler, die seit über einem Jahrhundert Milliarden an Forschungsgeldern umsetzten – als zuverlässige Quelle für Erkenntnisse über unsere eigene Entwicklung etabliert. Als Lohn der Mühen besitzen wir heute Belege für die materielle Kultur aus mehreren Jahrillionen, die unsere evolutionäre Vergangenheit erhellen. Wir stehen erst am Anfang, wenn es darum geht, ein ähnliches Gerüst für nichtmenschliche Tiere aufzubauen. Aber wer weiß, was wir mit einem offenen Geist noch finden werden? Es ist an der Zeit, das nächste Loch zu graben. ◀

### QUELLEN

**Haslam, M. et al.:** Archaeological excavation of wild macaque stone tools. *Journal of Human Evolution* 96, 2016

**Haslam, M. et al.:** Primate archaeology evolves. *Nature Ecology & Evolution* 1, 2017

**Haslam, M. et al.:** Wild sea otter mussel pounding leaves archaeological traces. *Scientific Reports* 9, 4417, 2019

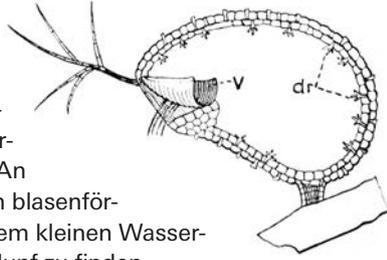
**Proffitt, T. et al.:** Wild monkeys flake stone tools. *Nature* 539, 2016

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

## FLEISCH FRESSENDE PFLANZEN IN HEIMISCHEN TÜMPELN

# 1920

»Auch unter unsrer einheimischen Pflanzenwelt gibt es einige fleischfressende Pflanzen, [etwa den] Wasser-schlauch (Utriculária). An seinen Blättchen sitzen blasen-förmige Gebilde. Wehe dem kleinen Wasser-floh, der hier Unterschlupf zu finden hofft; denn diese Blasen sind Fallen mit einem teuflisch errichteten Verhau von Borsten, die dem Kleingetier den Aus-gang versperren. Sehr bald beginnt seine Gefangenschaft ungemütlich zu werden. Die Innenwand ist mit Schleimdrüsen besetzt, die ihren Inhalt in die Blase ergießen. Dadurch wird das darin befindliche Wasser eingedickt, so daß der gefangene Wasserfloh elendiglich ersticken muß und in Fäulnis übergeht.« *Kosmos 5, S. 130*



Längsschnitt durch eine Blase. v: Öffnung; dr: Schleimdrüsen.

## EPIGENETIK IN DER MAUS

»Eine kleine Arbeit ist eine starke Stütze für den Glauben, daß alles, was wir denken oder lernen, nicht nur in unserem eigenen Gehirn Eindrücke zurückläßt, sondern als Vererbung von Erworbenem auch auf den Nachkommen übergeht. Bei Erwärmung der Umgebung versuchte eine Maus, sich in den Boden einzugraben. Bei Wiederholung der Versuche fingen die Tiere schon bei geringerer Temperatur bis zu 34,5° an zu graben. Die ersten vier Nachfahren-generationen hatten von dem Gelernten nichts geerbt, sie fingen erst bei 42–45° zu graben an. Bei der zwölften Generation aber gab es Tiere, die bereits bei 35° zu graben anfangen. Wenn eine Generation die Erfahrungen nicht machte, so betätigten deren Nachkommen immer noch die von den Großeltern ererbte Fähigkeit.« *Prometheus 1595, S. 272*

## VÖGEL BEFESTIGEN STRANDDÜNEN

»Der Schutz der Dünen als natürliches Bollwerk gegen Wind und Wasser an unseren Meeresküsten verschlingt alljährlich gewaltige Summen. Die Hilfe, welche die Vogelwelt bei diesen Aufgaben leistet, wird noch wenig gewürdigt. Sie besteht in der Verbreitung mancher Pflanzenarten, besonders des Sanddorns. [Er] bildet fast undurchdringliche Dickichte. Einzig durch beerenfressende Vögel ist diese erfreuliche Einbürgerung geschehen. Wo Vogelkolonien bestehen, bildet sich auf dem Dünensand eine Pflanzen-decke von tropischer Üppigkeit, die den verderblichen Einwirkungen des Windes ein Ziel setzt.« *Die Umschau 18, S. 321*

## SORGT GUTE HYGIENE FÜR REISEKRANKHEIT?

# 1970

»Mit zunehmendem Luftreiseverkehr entwickeln sich auch damit verbundene pathologische Erscheinungen. Die unangenehmste derartiger Komplikationen ist die Reise-Diarrhöe. Die Ursache ließ sich bislang nicht erklären. Bislang wurden nur zwei Studien über die Krankheit durchgeführt, eine [davon] in Teheran. Mit Hilfe von Fragebogen an 600 Teilnehmern wurde ermittelt, daß 28% an Diarrhöe litten, die innerhalb von zwei oder drei Tagen nach der Ankunft einsetzte. Unter 48 Iranern gab es nur einen Fall. Bei den Amerikanern hingegen litten daran 40%, unter den Briten 44%, bei den Deutschen 48% und den Südafrikanern 50%. Für die Krankheit [sind wohl] Bakterien oder Viren verantwortlich, für welche Personen aus Ländern mit nordeuropäischem Hygienestandard stärker empfänglich sind. Obwohl die Befunde für diese Hypothese sprechen, zeigt eine genauere Prüfung der Daten, daß sie nicht zu ernst genommen werden sollte. So ergab sich bei den Franzosen nur ein Vorkommen von 10%. Unter den Japanern, die als äußerst reinlich betrachtet werden, nur 12%. Am erstaunlichsten ist die Prozentzahl der Schweizer, nur 18%. Ein Vergleich dieser Zahl mit jener der Briten (44%) oder Deutschen (48%) würde bedeuten, daß die Engländer und die Deutschen ungefähr zweieinhalbmal hygienischer sind als die Schweizer.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 5, S. 200*

## ROBOTER-TAXIS IN NAHER ZUKUNFT

»In etwa fünf Jahren sollen in den englischen Grosstädten Roboter-Taxis ohne Chauffeur in Betrieb genommen werden. Sie sollen auf einer über der Strasse leicht überhöhten Leitschiene verkehren und von einer elektronischen Zentralanlage gesteuert werden. Wer ein solches Fahrzeug benutzen will, muss eine Lochkarte lösen, auf der er die gewünschte Strecke einstanzt. Dann nimmt der Passagier im nächsten Wagen Platz und steckt die Lochkarte in einen Schlitz. Alles weitere erledigt das Elektro-nengehirn der Zentralstelle.« *Neuheiten und Erfindungen 399, S. 86*

## 650 GRAMM HANDY, AM STÜCK

»Auf der Weltausstellung in Osaka werden die Japaner ein tragbares Taschentelefon vorführen, das die Größe von etwa drei Zigarettenschachteln hat, ca. 650 Gramm wiegt und ohne Mühe in der Seitentasche eine[s] Jackets Platz hat. Das Gerät wird von einer Nickel-Kadmium-Batterie gespeist. Die gewünschte Nummer wird wie bei einem normalen Telefon über eine Zentrale hergestellt, auf die das Gespräch mit hoher Frequenz übertragen wird.« *Neuheiten und Erfindungen 399, S. 87*

# GEOLOGIE

# EINE MILLION JAHRE REGEN

Eine lange, warme Regenperiode vor 232 Millionen Jahren könnte den Aufstieg der Dinosaurier angestoßen und die Geschichte des Lebens auf der Erde völlig verändert haben.



**Michael Marshall** ist Wissenschaftsjournalist in Devon, Großbritannien.

► [spektrum.de/artikel/1714782](https://spektrum.de/artikel/1714782)



GÖRLLA / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

► Eine Besonderheit in der Struktur der Felsformation nahe seinem Elternhaus in Somerset, Großbritannien, ließ Alastair Ruffell stutzig werden. Hier haben sich vor über 200 Millionen Jahren, während des Zeitalters der Trias, Sedimente abgelagert. Heute zeigen die Gesteinsschichten einen orangeroten Farbton, woraus Geowissenschaftler schließen, dass sie aus einer Zeit stammen, in der es auf der Erde heiß und trocken war. So weit ist das nicht ungewöhnlich. Doch durch das Herz des Orangerots der Felsvorsprünge auf Lipe Hill zieht sich ein dünner, grauer Streifen. Jenes Band zeugt davon, dass sich die extrem trockene Wüste mit einem Mal in ein sumpfiges Feuchtgebiet verwandelte – für mehr als eine Million Jahre.

Dieser Klimaumschwung ließ Russell nicht mehr los, nachdem er die Aufschlüsse Mitte der 1980er Jahre entdeckt hatte. Weil er mitten in seiner Doktorarbeit steckte, stellte der junge Geologe das triassische Rätsel zwar erst

**Sedimente aus der Zeit der Trias in den italienischen Dolomiten zeugen von einer überraschend nassen Phase in der Erdgeschichte.**

einmal beiseite. Doch dann begegnete er 1987 dem Paläontologen Michael Simms. Innerhalb seiner Postdocprojekte hatte dieser Hinweise darauf gefunden, dass in der späten Trias – während Ruffells mysteriöser Regenzeit – Arten ausgestorben waren. Ende der 1980er Jahre trieben die beiden Forscher ihre Idee, dass die Ereignisse zusammenhängen, voran. Jahrelang wurden ihre Ergebnisse jedoch zurückgewiesen.

Jetzt, drei Jahrzehnte danach, wächst die Überzeugung, dass sie doch Recht hatten. In der späten Trias ging etwas Seltsames vor sich, und zwar nicht nur im englischen Somerset. Vor etwa 232 Millionen Jahren, während des so genannten Karniums, regnete es fast überall auf der Erde. Nach Millionen von Jahren trockenen Klimas trat der Planet in eine Regenzeit ein, die eine bis zwei Millionen Jahre lang andauerte. An nahezu jeder Stelle, an der Geologen Felsen aus dieser Zeit finden, zeugen Spuren von dem extrem nassen Wetter. Diese Episode, genannt »Carnian pluvial episode« (CPE), fällt mit einigen massiven evolutionären Veränderungen zusammen.

Die vielleicht dramatischste: Die Regenperiode könnte sich just zu der Zeit ereignet haben, als eine seltene Gruppe von Reptilien – die frühen Dinosaurier – sich zu zahlreichen verschiedenen Spezies diversifizierte, die anschließend das Leben an Land dominierten. Das Karnium hätte damit so spektakulären Geschöpfen wie *Stegosaurus* oder *Tyrannosaurus*, die sich anschließend entwickelten, den Weg geebnet.



Weitere Spezies hatten zum Ende der Zeitspanne eine ganz andere Gestalt als zu deren Beginn: Riffbildende Korallen und marines Plankton wurden »moderner«, sie ähnelten danach viel mehr den heute lebenden Arten. Vielleicht entstanden damals sogar die ersten Säugetiere. »Die Regenzeit während des Karniums war fast wie ein Wendepunkt zwischen einer eher alten Welt und einer modernen«, sagt Simms.

Nach Jahren der Vernachlässigung entwickelt sich die karnische Regenzeit jetzt zu einem größeren Forschungsschwerpunkt. Im Mai 2017 trafen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in Delmenhorst zur ersten Konferenz, die dem Themengebiet gewidmet war. Seither hat das »Journal of the Geological Society« zwei Sonderausgaben zu dieser Zeitspanne veröffentlicht. Zahlreiche Forschungsgruppen haben in den letzten zehn Jahren begonnen, Ablagerungen aus dem Karnium zu untersuchen. Sie wollen verstehen, warum sich das Klima geändert hat und weshalb dies zu solch dramatischen evolutionären Änderungen führte. Derzeit deuten die Spuren darauf hin, dass massive Vulkanausbrüche dafür verantwortlich waren.

### **Aussterbewellen bei Seelilien, Amphibien und Landpflanzen**

Das ist eine bemerkenswerte Wende für ein Ereignis, das in den 1980er Jahren fast zufällig entdeckt wurde. Die Geschichte begann, als Michael Simms, der jetzt an den National Museums Northern Ireland in Holywood (UK) forscht, für einen Postdocaufenthalt an die University of Liverpool ging. Dort untersuchte er Seelilien, blumenähnlich aussehende Meerestiere, die mit den heutigen Seesternen verwandt sind.

Simms' Forschungsschwerpunkt lag auf denjenigen Seelilien, die während der Trias lebten. Diese Periode der Erdgeschichte erstreckte sich von 252 bis 201 Millionen Jahren vor heute und wird von zwei der turbulentesten Ereignisse der Vergangenheit eingerahmt: Sie begann nach einem Massenaussterben am Ende des Perm und endete

mit einem weiteren Massenaussterben bei ihrem Übergang zum Jura (siehe »Zeit der Veränderung«, S. 49).

Aber auf den Forscher wartete eine Überraschung. »Ende 1987 war klar, dass in der Trias sehr viele Seelilien ausstarben«, sagt er. Das geschah jedoch mehrere zehn Millionen Jahre vor dem Ende der Periode, und zwar während des Karniums. Dieses ist die fünfte der sieben kürzeren Zeitspannen (genannt Stufen), in welche die Trias unterteilt wird.

Fasziniert kehrte Simms für einen Besuch an die University of Birmingham zurück, an der er seine Doktorarbeit gemacht hatte. In dem alten Büro des Wissenschaftlers arbeiteten jetzt der Paläontologe Paul Wignall und Alastair Ruffell, der heute an der Queen's University Belfast forscht.

Ruffell beschäftigte sich eigentlich mit Sedimenten aus der späteren Kreidezeit, doch aus privatem Interesse untersuchte er triassische Gesteine, genannt Mercia Mudstone Group, die hauptsächlich von einem trockenen Klima zeugen. Im karnischen Abschnitt der Felsen entdeckte er eine dünne Schicht aus grauem Sandstein, die zahlreiche Fossilien sowie Haizähne beherbergte: unverkennbar Überreste eines Flusses oder Deltas. »Und zack, inmitten all dieser Hinweise auf schrecklich trockene Regionen fanden sich auf einmal Spuren dieser wohl recht hübschen Umgebung«, bringt es Ruffell auf den Punkt.

Während einer Unterhaltung erwähnte Simms die Aussterbewellen der Seelilien. Laut Simms und Wignall antwortete Ruffell: »Damals hat es geregnet. Vielleicht hat das den Seelilien nicht gefallen.« Der Geologe erinnert sich nicht an diese flapsige Bemerkung, bei Simms allerdings traf sie einen Nerv. Es ist bekannt, dass Klimaänderungen zu Massenaussterben führen können, also war das möglicherweise die Erklärung für die Verschiebungen während des Karniums.

Simms und Ruffell begannen ihre Untersuchungen und fanden heraus, dass Felsen aus Deutschland, den USA, im Himalaja und an weiteren Orten ebenfalls Hinweise auf eine Regenperiode in diesem Zeitalter beherbergten. Darüber hinaus waren nicht allein die Seelilien vom Aussterben betroffen: Amphibien und Landpflanzen wurden ebenfalls stark dezimiert. 1989 publizierte das Duo die zusammengetragenen Hinweise auf die lange Regenzeit und nannte sie »Carnian pluvial episode«.

Die Ergebnisse wurden kaum beachtet, außer von ein paar wenigen Forschern, die sie angriffen. »Ich erinnere mich, dass ein oder zwei ziemlich erfahrene Wissenschaftler die Idee für absurd hielten«, sagt Simms.

Fünf Jahre später, 1994, wies ein Team unter der Leitung von Henk Visscher von der Universität Utrecht in den Niederlanden die These der beiden jungen Wissenschaftler scharf zurück. Sie stellten die Behauptung auf, dass zwar einige Gegenden während der fraglichen Zeitspanne regenreich gewesen seien, viele Regionen aber auch trocken geblieben waren. Statt durch vermehrten Regen könne man die Befunde auch durch »höhere Grundwasserstände« erklären, argumentierte Visscher.

Nach diesem Dämpfer änderten Simms und Ruffell ihre Forschungsrichtung. »Wir beschäftigten uns mit allerlei anderen Dingen«, sagt Simms. Während er eine Karriere als

## **AUF EINEN BLICK WENDEPUNKT IN DER GESCHICHTE DES LEBENS**

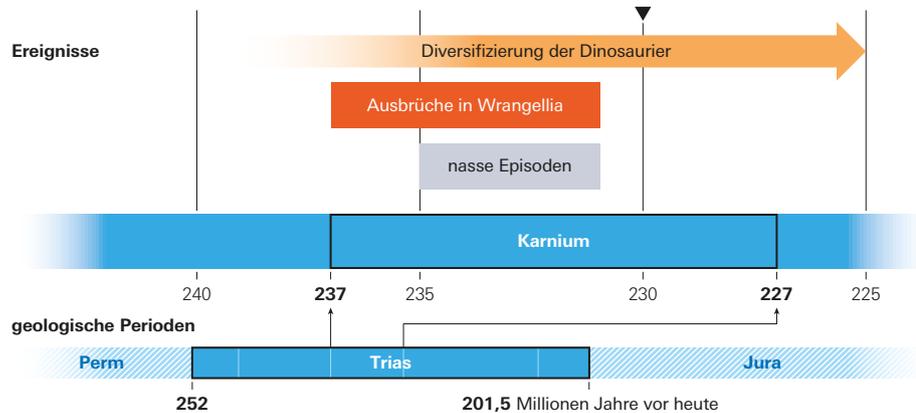
- 1** Immer mehr Spuren deuten darauf hin, dass die Erde vor rund 232 Millionen Jahren nach einer trockenen Zeit in eine warme, regenreiche Phase überging.
- 2** In dieser Zeit liefen drastische evolutionäre Veränderungen ab. So entwickelten sich zahlreiche Dinosauriergruppen, die anschließend das Leben auf der Erde dominierten.
- 3** Grund für den Klimaumschwung könnten massive Vulkanausbrüche im heutigen Nordwestkanada gewesen sein. Das ist jedoch nicht eindeutig geklärt.

## Zeit der Veränderung

Nach Millionen von Jahren trockenem Klima durchlief die Erde eine Reihe von feuchten Phasen, die insgesamt über eine Million Jahre andauerten. Diese nasse Episode ereignete sich während des Karniums, einer Zeitstufe in der späten Trias. Gleichzeitig mit diesem Klimaumschwung fanden im heutigen Nordwesten Nordamerikas massive Vulkanausbrüche statt und brachten riesige Basaltformationen hervor. Die geologische Umwälzung könnte weitreichende evolutionäre Veränderungen in Gang gesetzt haben, unter anderem die Entstehung neuer Gruppen von Dinosauriern.



Die Erde während des Karniums in der Trias, etwa 230 Millionen Jahre vor heute



NATURE, MICHELELLI, A. ET AL., TRASSIC EXTINCTIONS AND EXPLOSIONS, GESCHENISST 28, 2016, FIG. 1; MARSHALL, M., A MILLION YEARS OF TRASSIC RAIN, NATURE 576, 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Geologe und Paläontologe verfolgte, wurde Ruffell Experte für forensische Geologie.

Die karnische Regenzeit verschwand jedoch nicht ganz von der Tagesordnung. Geologen in Europa, vor allem in Italien, sammelten weitere Beweise für ein nasses Klima vor 232 Millionen Jahren. Die Übereinstimmungen wurden mehr und mehr.

In der späten Trias sah die Welt völlig anders aus als heute (siehe »Zeit der Veränderung«, oben). Alle Landmassen waren miteinander verbunden und bildeten den Superkontinent Pangäa. Das Klima war heiß und trocken, insbesondere im Innern des riesigen Kontinents. Reptilien dominierten an Land, darunter fanden sich auch die ersten Dinosaurier. Blumen, Gräser oder Vögel existierten nicht.

### Gab es im Karnium die ersten Säugetiere?

Genauso wenig existierten Säugetiere, doch das könnte sich während des Karniums geändert haben. 2005 beschrieb P. M. Datta, der beim Geological Survey of India forscht, dass er einen einzelnen Zahn eines Säugetiers in einer aus dieser Epoche stammenden Schicht eines Felsens in Indien gefunden hatte. Ein weiterer Zahn, der in karnischen Gesteinen in Deutschland entdeckt wurde, könnte ebenfalls einem Säuger gehört haben.

Die Entstehung der Säugetiere ist ein heiß debattiertes Thema. Wignall, heute an der University of Leeds in Großbritannien, sagt, sie könnten erstmals während des Karniums aufgetaucht sein. Es ist aber auch möglich, dass es ältere Exemplare gibt, die noch nicht gefunden wurden. Währenddessen argumentieren viele Paläontologen, dass die echten Säugetiere erst im Jura entstanden, Millionen

Jahre später. Falls das stimmt, stammen die karnischen Fossilien nicht von ihnen, könnten jedoch ihren Vorfahren gehört haben.

Unabhängig von der Entstehung der Säugetiere deutet eine Reihe von Entdeckungen aus den letzten rund zehn Jahren stark auf weitere evolutionäre Veränderungen in der späten Trias hin. 2013 berichtete eine Forschungsgruppe, dass winziges, nur wenige Mikrometer großes Kalk bildendes Plankton seinen Ursprung im Karnium fand. Solche einzelligen Organismen umgeben sich mit harten Schalen aus Kalziumkarbonat. Heute bilden sie teils riesige Blüten in den Ozeanen und spielen eine bedeutende Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf, weil sie Kohlenstoffdioxid aus der Luft binden.

Eine weitere Gruppe, die etwa zur gleichen Zeit größere Veränderungen erfuhr, waren skelettbildende Korallen. Aus ihnen bestehen die riesigen Korallenriffe, die wir heute kennen. Zwar tauchten sie bereits während der Trias auf, doch erst im Karnium oder kurz danach begannen sie, große Riffe auszubilden. Isotopennachweise und andere Spuren aus fossilen Korallen legen nahe, dass sie sich zu dieser Zeit mit ihren heutigen Symbionten zusammengefunden haben: Algen, die Fotosynthese betreiben und sie dadurch mit Nährstoffen versorgen.

Nicht jeder ist davon überzeugt, dass die Welt vor etwa 232 Millionen Jahren eine warme, regenreiche Phase durchlief. »Ich habe immer noch meine Zweifel«, sagt Visscher. Er erkennt zwar an, dass sich das Klima änderte, doch seiner Ansicht nach könnte der Regen auch saisonal ausgefallen sein, so dass die Vegetation jedes Jahr aufs Neue aufblühte. Ähnlich skeptisch ist Matthias Franz von



**Aus den frühen Dinosauriern entwickelten sich innerhalb kurzer Zeit zahlreiche verschiedene Arten.**

der Georg-August-Universität Göttingen: Er hat Anhaltspunkte dafür gefunden, dass die zusätzliche Feuchtigkeit von einem steigenden Meeresspiegel her gerührt haben könnte, zumindest in Teilen Europas. Es ist jedoch noch nicht klar, ob das auch die Veränderungen an anderen Orten erklären kann. Trotzdem betont Franz, dass die Zeitspanne ohne Zweifel bedeutend ist. »Es passiert auf jeden Fall etwas zu dieser Zeit – die Frage ist nur, was.«

Simms und Ruffel hatten bereits früher vermutet, dass Vulkanausbrüche für den triassischen Klimawandel verantwortlich waren. Geologen kannten einen sehr guten Kandidaten dafür: eine verheerende Katastrophe (ein so genannter Kataklysmus). Sie schuf massive, teils mehrere Kilometer dicke Basaltformationen, die sich heute von Britisch-Kolumbien im Westen Kanadas entlang der Küste hinauf bis nach Alaska ziehen.

Diese Lavamassen wurden 1977 auf den Namen Wrangellia getauft, nach den Wrangell Mountains im Südosten Alaskas. Sie sind Teil einer so genannten magmatischen Großprovinz, das heißt einer Gegend, die riesige Mengen an magmatischen Gesteinen enthält. Sie entstand, als Vulkane vor rund 232 Millionen Jahren über hunderttausende oder gar Millionen Jahre hinweg Unmengen an Lava ausstießen. Die Vulkane waren anfangs untermeerisch,

aber durch die sich auftürmenden Lavamassen ragten sie schließlich über die Wasseroberfläche hinaus, sagt der Geologe Andrea Marzoli von der Universität Padua in Italien.

Wenn sich diese gewaltigen Vulkanausbrüche zur selben Zeit wie die karnische Regenzeit ereigneten, könnte das einiges erklären. Sie haben vermutlich so viel Kohlenstoffdioxid ausgestoßen, dass sich die Erde erwärmte. Dadurch könnte durch die stärkere Verdunstung von Wasser aus Meer und Flüssen mehr Regen gefallen sein. Manche Wissenschaftler sind auch der Ansicht, dass der Begriff Regenepisode irreführend ist, weil die hauptsächliche Veränderung zu der Zeit eine globale Erwärmung gewesen sei.

### Unsichere Datierungen

»Es war nun das Nächstliegende, der Frage auf den Grund zu gehen, ob die Zunahme an Niederschlägen, die überall beobachtet wurde, durch einen Anstieg von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre hervorgerufen wurde«, sagt Jacopo Dal Corso, Geologe an der University of Leeds. Sein Team untersuchte Proben von kohlenstoffreichem Material aus den italienischen Alpen aus der Zeit des Karniums. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass damals eine große Menge des auf der Erde häufigsten Kohlenstoffisotops <sup>12</sup>C in die Atmosphäre ausgestoßen wurde – und Eruptionen in Wrangellia könnten die Hauptquelle dafür dargestellt haben.

Nachfolgende Studien haben Dal Corsos Behauptung gestützt, dass der Kohlenstoffkreislauf während des Karniums für etwa eine Million Jahre durch Vulkanausbrüche aus dem Gleichgewicht geworfen war. Doch für manche Experten ist der Zusammenhang eher mit Vorsicht zu genießen, denn Unsicherheiten bei der Datierung von Gesteinen machen es schwer, eindeutig zu sagen, ob die Ausbrüche von Wrangellia gleichzeitig mit den klimatischen und evolutionären Veränderungen stattfanden. Laut Wignall liegt das daran, dass das Karnium noch nicht ausreichend untersucht wurde: Unsicherheiten können bis zu eine Million Jahre betragen. Marzoli plant, im Sommer 2020 Proben von Wrangellia zu nehmen, teilweise, um dessen Alter zu bestimmen. Seiner Meinung nach sind die Vulkanausbrüche in dem riesigen Gebiet auch deswegen die wahrscheinlichste Erklärung, weil es keine anderen Kandidaten gibt.

Unterdessen finden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler immer mehr evolutionäre Veränderungen, die sich während der nassen Zeit in der späten Trias ereignet haben. Die dramatischste Behauptung lautet, das Karnium sei entscheidend für die rasche evolutionäre Expansion der Dinosaurier gewesen. Verschiedenen Hinweisen zufolge tauchten sie schon vorher, vor etwa 245 Millionen Jahren, auf. Spuren von diesen frühen Lebewesen werden aber nur selten gefunden, und es sind nur wenige Spezies bekannt.

Klar ist hingegen, dass die Dinosaurier sich innerhalb eines kurzen Zeitraums drastisch verändert haben. Zu Beginn des Karniums waren sie alle klein und zweibeinig. Gegen dessen Ende jedoch hatten sich bereits die beiden Hauptgruppen ausgebildet. Das waren auf der einen Seite die Vogelbeckensaurier, etwa Kreaturen wie *Stegosaurus* und *Triceratops*; auf der anderen Seite die Echsenbeckensaurier, aus denen riesige Langhalsdinosaurier wie *Brachiosaurus* oder zweibeinige Raubsaurier wie *Tyrannosaurus rex*

und die heutigen Vögel hervorgingen. Ein Team um Michael Benton, Paläontologe an der University of Bristol, dokumentierte einige solcher Veränderungen, indem es anhand gut datierter Proben aus den Alpen eine hochaufgelöste Zeitskala von Tierspuren in der späten Trias erstellte. Demnach herrschte im frühen Karnium eine Gruppe von Reptilien vor, die *Crurotarsi* genannt wird und von der die heutigen Krokodile abstammen. Doch gegen Ende der Zeitstufe dominierten die Dinosaurier. Diese Verschiebung dauerte nur vier Millionen Jahre und fand gleichzeitig mit der karnischen Regenepisode statt. Anschließend beherrschten die Dinosaurier mehr als 150 Millionen Jahre lang die Erde.

All die vielen Umwälzungen und dazu noch die ungenauen Datierungen der Gesteine aus der untersuchten Zeit machen es Wissenschaftlern schwer, ein einheitliches Bild davon zu zeichnen, wie sich das Klima veränderte und wie sich dies auf verschiedene Ökosysteme auswirkte. Doch das Karnium ist ein heißes Thema geworden. »Faszinierend ist an der Zeitepoche beispielsweise, wie viele moderne Arten auftauchen, von Wirbeltieren bis hinunter zu Plankton«, sagt Wignall.

Offenbar hat in jener Zeit einer der bedeutendsten Übergänge des Lebens stattgefunden. Die beiden Wissenschaftler, die die Sache ins Rollen gebracht haben, freuen sich darüber, wie sich das Forschungsfeld seither entwickelt hat. Simms begnügt sich mit der Rolle des Zuschauers, doch Ruffell hat die Untersuchung der karnischen Geologie wieder aufgenommen. Das Ironische dabei sei, so sagt er,

dass er das karnische Zeitalter nur in seiner Freizeit untersucht habe. Diese schicksalhafte Epoche, die die Geschichte der Evolution so drastisch veränderte, sei »von ein paar Kerlen entdeckt worden, die eigentlich gar nicht daran hätten arbeiten sollen«. ◀

#### QUELLEN

**Bernardi, M. et al.:** Dinosaur diversification linked with the Carnian Pluvial Episode. *Nature Communications* 9, 2018

**Dal Corso, J. et al.:** Multiple negative carbon-isotope excursions during the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic). *Earth-Science Reviews* 185, 2018

**Franz, M. et al.:** Eustatic control on epicontinental basins: The example of the Stuttgart Formation in the Central European Basin (Middle Keuper, Late Triassic). *Global and Planetary Change* 122, 2014

**Simms, M. J., Ruffell, A. H.:** Synchronicity of climatic change and extinctions in the Late Triassic. *Geology* 17, 1989

**Visscher, H. et al.:** Rejection of a Carnian (Late triassic) »pluvial event« in Europe. *Review of Palaeobotany and Palynology* 83, 1994

#### nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
Nature 576, S. 26–28, 2019

Spektrum PLUS+

## Ihre Vorteile als Abonnent

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

- > Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**
- > Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von **Partnern** zum **Vorteilspreis**
- > **Digitales Produkt** zum kostenlosen Download und weitere Vorteile:  
Download des Monats im April: Spektrum Kompakt »Vermessung der Erde«  
Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen  
Reduzierte Digitalpakete »Sport«, »Mathematik« sowie **Gehirn&Geist**-Jahrgang 2019

Weitere Informationen und Anmeldung:  
**Spektrum.de/plus**

# AERODYNAMIK DAS GEHEIMNIS DES FLIEGENS



## AUF EINEN BLICK NUR VERSTEHEN IST SCHÖNER

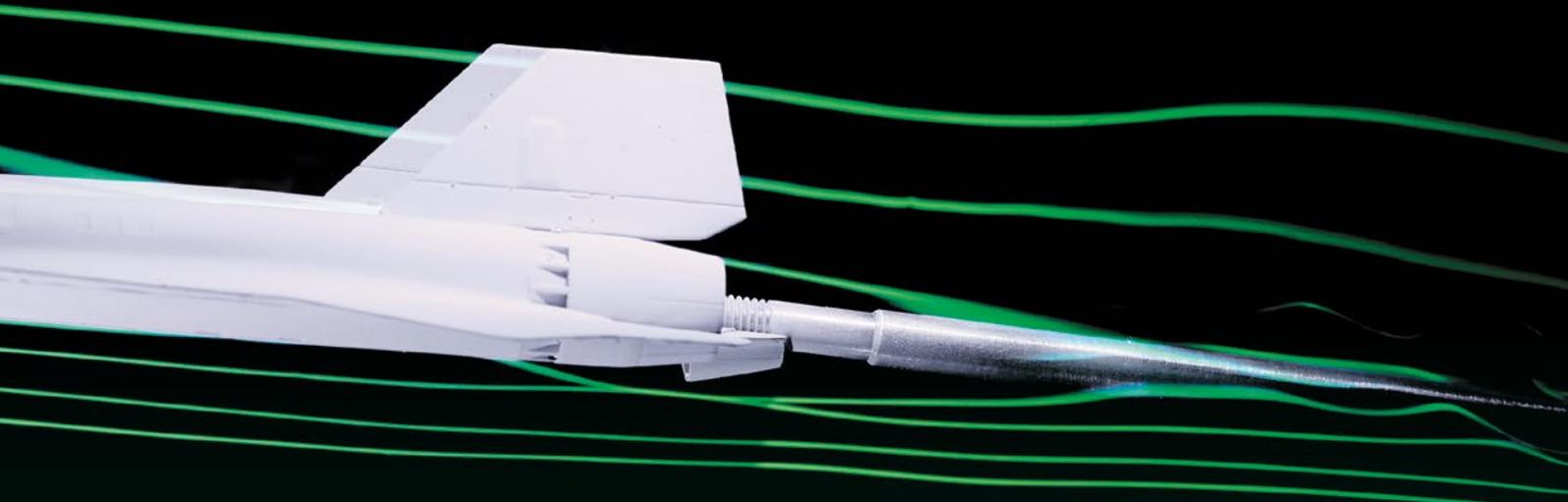
- 1** Auf streng mathematischer Ebene wissen Ingenieure genau, warum Flugzeuge in der Luft bleiben. Doch es fehlt bis heute an einem gleichermaßen anschaulichen wie korrekten Modell.
- 2** Die beiden gängigen populären Darstellungen der verschiedenen Kräfte und Einflussfaktoren haben fundamentale Schwächen.
- 3** Aerodynamiker suchen schon lange nach einer allgemein verständlichen Interpretation ihrer Gleichungen. Neue Erklärungsansätze kommen dem zumindest ein wenig näher.

**Eine umströmte Tragfläche erzeugt Auftrieb und hält so Flugzeuge in der Luft. Das lässt sich zwar gut berechnen und simulieren, aber die üblichen Erklärungen dafür sind unvollständig.**



**Ed Regis** ist Wissenschaftsautor und Privatpilot mit einer Erfahrung von mehr als 1000 Flugstunden.

► [spektrum.de/artikel/1714786](https://spektrum.de/artikel/1714786)



Bei Versuchen in einem Flüssigkeitstank im NASA Ames Fluid Mechanics Laboratory umströmen Linien eines fluoreszierenden Farbstoffs das Modell eines Flugzeugs.

Im Dezember 2003 veröffentlichte die »New York Times« anlässlich des 100. Jahrestags des ersten Motorflugs der Gebrüder Wright einen Artikel, um eine scheinbar einfache Frage zu beantworten: Was hält Flugzeuge in der Luft? Dazu wandte sich die Zeitung an einen namhaften Autor mehrerer Lehrbücher auf dem Gebiet: John D. Anderson jr., Kurator für Aerodynamik am National Air and Space Museum in Washington, D.C.

Anderson jedoch betonte der »Times« gegenüber, es gebe »keine knappe Antwort« hinsichtlich des Ursprungs der als dynamischer Auftrieb bezeichneten Kraft. Experten vertreten unterschiedliche Ansichten, manche sogar mit »religiöser Inbrunst«. Daran hat sich bis heute nichts geändert. Das ist an diesem Punkt in der Geschichte des Fliegens ziemlich erstaunlich. Selbst die natürlichen Prozesse der Evolution haben bereits vor Äonen Wege in die Luft gefunden. Warum sollte es so schwer sein zu erklären, wie es dazu kommt?

Zu der Verwirrung trägt die Tatsache bei, dass man das Problem von zwei Seiten angehen kann: einer technischen und einer nichttechnischen. Erstere steht fest auf einem streng mathematischen Fundament aus Gleichungen, Symbolen, Computersimulationen und Zahlen. In diesem Bereich gibt es nur wenige ernsthafte Meinungsverschiedenheiten über die geeigneten Methoden. Die Theorie macht dort sehr genaue Vorhersagen und produziert verlässliche Ergebnisse für Luftfahrtingenieure, die Flugzeuge konstruieren wollen.

Bloß sind Gleichungen und ihre Lösungen an und für sich keine befriedigenden Erklärungen. Die zweite, nicht-technische Ebene der Analyse sollte uns eine vernünftige physikalische Anschauung liefern und ein intuitives Verständnis für die Kräfte vermitteln, die ein Flugzeug in der Luft halten. Und zwar nicht mit Zahlen und Formeln, sondern auf der Basis von Konzepten und Prinzipien, die auch Laien vertraut sind.

## Kein Modell verschafft einen vollständigen Überblick, ohne Fragen offenzulassen

Genau hier beginnen die Kontroversen. Zur Erklärung des Auftriebs werden meist zwei verschiedene Modelle herangezogen. Für sich genommen liefert jedes der beiden richtige Einsichten. Aber keines verschafft einen vollständigen Überblick, der alle grundlegenden Einflussfaktoren und physikalischen Bedingungen berücksichtigt, ohne irgendwelche Fragen offenzulassen.

Die erste und bei Weitem populärste Erklärung des Auftriebs basiert auf dem so genannten Satz von Bernoulli, benannt nach dem Schweizer Mathematiker Daniel Bernoulli, der die entsprechenden Gleichungen 1738 hergeleitet hat. Luft gehört als Gas gemeinsam mit den Flüssigkeiten zu den so genannten Fluiden. Darum begegnet man dem mit Bernoullis Namen verbundenen Theorem üblicherweise im Rahmen der Fluidodynamik. Vereinfacht besagt es, dass

der Druck in einem Fluid mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt und umgekehrt bei einer langsameren Strömung größer wird.

Laut dem darauf aufbauenden Erklärungsansatz ergibt sich der Auftrieb einer Tragfläche aus dem Profil, also der Form ihres Querschnitts. Luft bewegt sich an der gekrümmten Oberseite des Flügels schneller als entlang der flachen Unterseite. Die oben erhöhte Geschwindigkeit soll dann zu einem geringeren Druck führen und für Auftrieb sorgen.

Zahllose empirische Daten aus Windkanalversuchen, Laborexperimenten und vielem mehr liefern überwältigende Beweise für die Richtigkeit von Bernoullis Prinzip. Aus mehreren Gründen reicht es aber nicht aus, um den Auftrieb vollständig zu erklären. Denn das Theorem sagt nichts darüber aus, wie die höhere Geschwindigkeit über dem gekrümmten Flügel überhaupt zu Stande kommt.

### Anschaulich, eingängig und leider falsch

Es gibt dazu viele schlechte Veranschaulichungen. Nach der gängigsten müssen Luftpakete, die sich an der Vorderkante des Flügels trennen, an der Hinterkante gleichzeitig wieder zusammenkommen. Da das oberste Paket in einer jeden Zeitspanne weiter als das untere wandert, ist es notgedrungen schneller. Es gibt allerdings keinen physikalischen Grund dafür, dass die beiden Pakete gleichzeitig die Hinterkante erreichen müssen. Und in der Tat tun sie das nicht – die Luft bewegt sich oben nämlich sogar noch schneller!

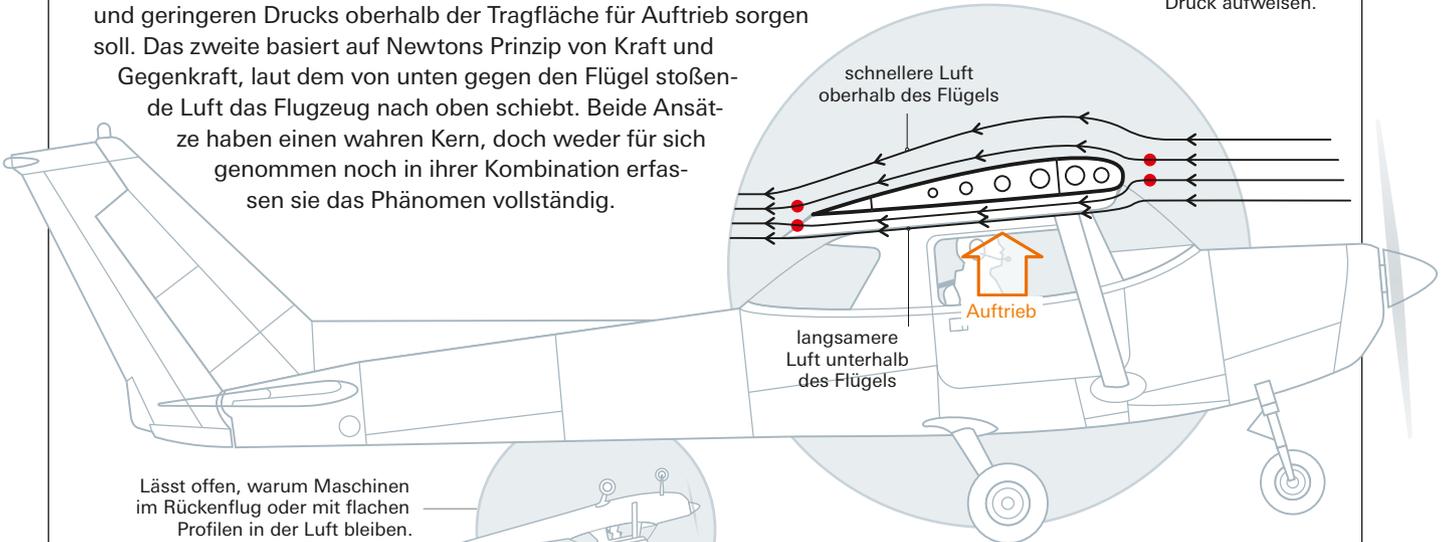
Immer wieder gibt es in populärwissenschaftlichen Berichten, Youtube-Videos und sogar in einigen Lehrbüchern Anleitungen für angebliche Demonstrationen des Bernoulli-Prinzips. Dazu hält man beispielsweise ein Blatt Papier horizontal vor die Unterlippe. Dann bläst man über die Oberseite, die nach vorn herunterhängt und deswegen gewölbt ist. Das Blatt hebt sich, angeblich wegen des Bernoulli-Effekts. Doch das hat andere Ursachen als unterschiedlich schnelle Luft auf den beiden Seiten. Um sich davon zu überzeugen, kann man an einem geraden Stück Papier entlangpusten, etwa einem, das senkrecht nach unten hängt. Wie Holger Babinsky, Professor für Aerodynamik an der University of Cambridge, in einem Artikel in der Zeitschrift »Physics Education« 2003 betont hat, wird es sich dann weder in die eine noch in die andere Richtung krümmen, denn »der Druck auf beiden Seiten ist trotz des offensichtlichen Geschwindigkeitsunterschieds gleich groß«.

Der zweite Mangel des Bernoulli-Ansatzes: Er begründet nicht, weshalb die höhere Geschwindigkeit oben auf dem Flügel überhaupt einen niedrigeren Druck mit sich bringt – und nicht etwa einen höheren. Schließlich könnte die Luft durch die Krümmung ja nach oben hin verdrängt und somit komprimiert werden. Im Alltag verlangsamt eine solche Art von Engpass normalerweise die Dinge, anstatt sie zu beschleunigen. Wenn etwa auf einer Autobahn mehrere Fahrspuren in eine übergehen, fahren die beteiligten Autos nicht schneller. Zwar verhalten sich Luftmoleküle über einem Flügel anders, aber Bernoulli hilft nicht dabei, den Unterschied zu verstehen.

# Auftrieb: Die üblichen Verdächtigen

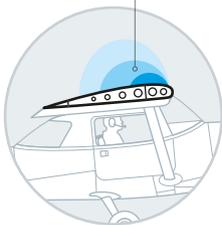
Um zu erklären, was ein Flugzeug in der Luft hält, wird üblicherweise eines von zwei Modellen herangezogen. Das erste bezieht sich auf die Gesetze von Bernoulli, nach denen ein Bereich höherer Geschwindigkeit und geringeren Drucks oberhalb der Tragfläche für Auftrieb sorgen soll. Das zweite basiert auf Newtons Prinzip von Kraft und Gegenkraft, laut dem von unten gegen den Flügel stoßende Luft das Flugzeug nach oben schiebt. Beide Ansätze haben einen wahren Kern, doch weder für sich genommen noch in ihrer Kombination erfassen sie das Phänomen vollständig.

**Der Satz von Bernoulli**  
Wegen des gekrümmten Profils einer Tragfläche soll Luft, die sich darüber hinwegbewegt, schneller sein als an der geraden Unterseite und deswegen einen geringeren Druck aufweisen.

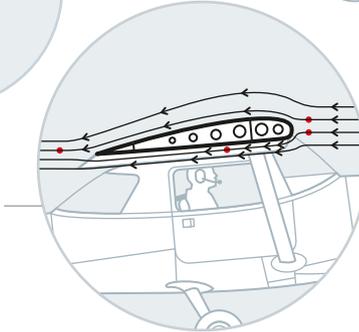


Lässt offen, warum Maschinen im Rückenflug oder mit flachen Profilen in der Luft bleiben.

Erklärt den Bereich geringeren Drucks oberhalb der Tragfläche nicht vollständig.

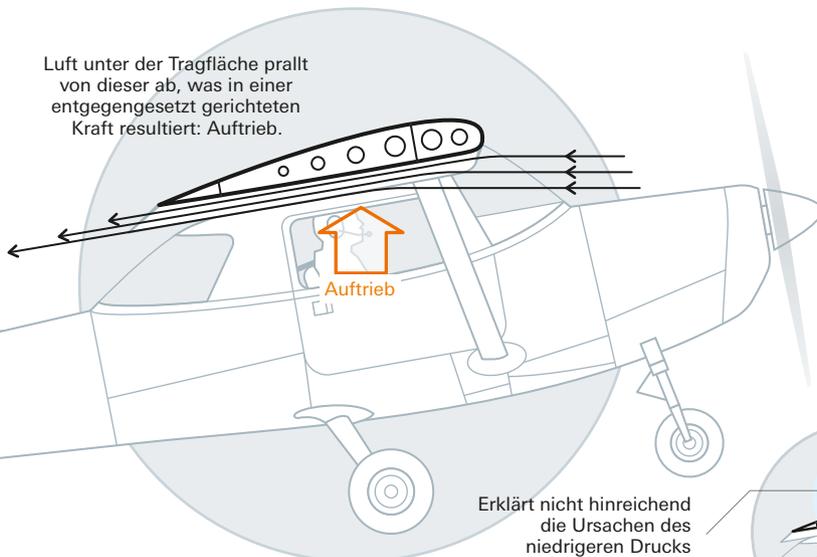


Es bleibt unklar, warum zwei Teile der Luft, die sich vor dem Profil trennen, dessen Ende gleichzeitig erreichen sollen. In Wirklichkeit kommt das obere Paket dort sogar schneller an als sein Partner.

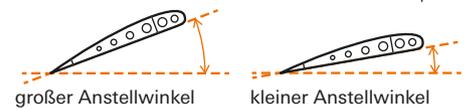


Allerdings reicht Bernoullis Theorem nicht für eine Erklärung aus. Zwar strömt Luft entlang einer Biegung tatsächlich schneller, doch in diesem Fall ist weder klar, warum das so ist, noch, wieso deswegen der Druck abnehmen sollte. In der Praxis können Flugzeuge trotz so einer Tragflächenform sogar kopfüber fliegen.

Luft unter der Tragfläche prallt von dieser ab, was in einer entgegengesetzt gerichteten Kraft resultiert: Auftrieb.

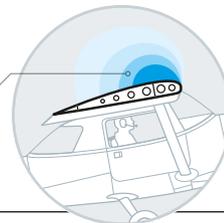


**Newtons drittes Gesetz**  
Wenn Luft auf einen Flügel trifft und dieser sie nach unten ablenkt, sollte sie eine gleich große, entgegengesetzt gerichtete Kraft nach oben ausüben. Der Ansatz funktioniert bei Profilen jedweder Form und Orientierung, auch kopfüber. Wichtig ist nur ein passender Anstellwinkel. Darum ist das Modell besser geeignet als das auf Basis von Bernoullis Theorem.



Allerdings gibt es eine Region geringeren Drucks oberhalb des Flügels. Sie existiert unabhängig davon, ob er gebogen ist oder nicht und lässt sich aus dem Prinzip von Kraft und Gegenkraft nicht ohne Weiteres herleiten.

Erklärt nicht hinreichend die Ursachen des niedrigeren Drucks oberhalb des Flügels.



Es gibt noch ein drittes, besonders einleuchtendes und entscheidendes Argument: Flugzeuge können in Rückenlage fliegen. Dabei wird die gekrümmte Flügelfläche zur Unterseite. Dort sollte laut dem Bernoulli-Erklärungsansatz nun ein niedrigerer Druck herrschen, der gemeinsam mit der Schwerkraft das Flugzeug nach unten zieht. Dennoch klappt das Kunststück, sogar mit allen möglichen Profilen, solange die Tragfläche in einem geeigneten Anstellwinkel auf die Luft trifft.

Spätestens hier schneidet das andere populäre Modell für die aerodynamischen Ursachen des Flugs besser ab. Es basiert auf dem dritten newtonschen Bewegungsgesetz, dem Prinzip von Kraft und Gegenkraft. Demnach hält der Flügel das Flugzeug oben, indem er Luft nach unten drückt. Bewegte Atmosphärenteilchen besitzen eine Masse, und ihr Aufprall auf den Flügel lenkt sie nach unten ab und führt zu einem entgegengesetzten Impuls nach oben. Das Prinzip gilt für Profile jeder Form, ob gebogen oder flach, symmetrisch oder nicht, sowie für alle Fluglagen, ob normal oder kopfüber. Wir kennen die wirkenden Kräfte aus alltäglicher Erfahrung, wenn wir beispielsweise die Handfläche aus dem Fenster eines fahrenden Autos herausstrecken. Sie wird hochgedrückt, sobald wir sie schräg gegen den Fahrtwind stellen. Aus diesen Gründen bietet das dritte newtonsche Gesetz einen umfassenderen Zugang zum dynamischen Auftrieb als der Satz von Bernoulli.

Selbst das löst noch nicht alle Probleme. So gibt es oberhalb der Tragfläche unabhängig von der Wölbung des Profils einen geringeren Druck. Er verschwindet erst, wenn ein Flugzeug zum Stillstand kommt. Dann passt sich die Region oberhalb der Tragfläche dem Umgebungsdruck an. Doch solange ein Flugzeug fliegt, ist ein Unterschied vorhanden und in der Gesamtbetrachtung unverzichtbar für den dynamischen Auftrieb – und mit den newtonschen Gesetzen von Kraft und Gegenkraft nicht ohne Weiteres zu erklären.

### Einsteins Katzenbuckel

Bernoulli und Newton lebten lange vor der Entwicklung der ersten Flugzeuge. Erst im 20. Jahrhundert wurde es nötig, ihre jeweiligen Theorien auf die neuen Fragen der Aerodynamik anzuwenden. Zunächst behandelten Wissenschaftler die Luft als perfekte Flüssigkeit, das heißt als inkompressibel und ohne Viskosität. Das waren unrealistische Annahmen, aber vielleicht verständlich für den ersten Versuch, mit dem neuen Phänomen des mechanischen Flugs umzugehen. Die Vereinfachungen hatten ihren Preis: Mathematisch funktionierten die Abhandlungen über Tragflächen in idealen Gasen gut, nur empirisch blieben sie unbefriedigend.

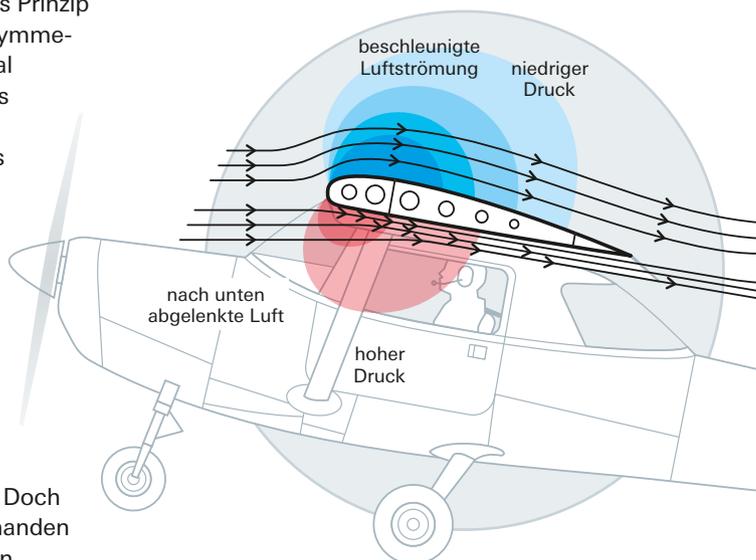
Das zeigt das Beispiel keines Geringeren als Albert Einstein, der sich mit dem Problem des Auftriebs beschäftigte. 1916 veröffentlichte er in der Zeitschrift »Die Naturwissenschaften« eine kurze Abhandlung mit dem Titel »Elementare Theorie der Wasserwellen und des Fluges«, in der er die Tragfähigkeit von Flügeln in Natur und Technik zu erklären versuchte.

## Neue Veranschaulichungen

Modernste Computersimulationen und aufwändige mathematische Modelle behandeln beim Design von Flugzeugen alle Aspekte realer Strömungen. Trotzdem fehlt weiterhin ein griffiges qualitatives Bild. Einige Ansätze gehen zumindest in eine viel versprechende Richtung.

### Die vier Elemente des Auftriebs

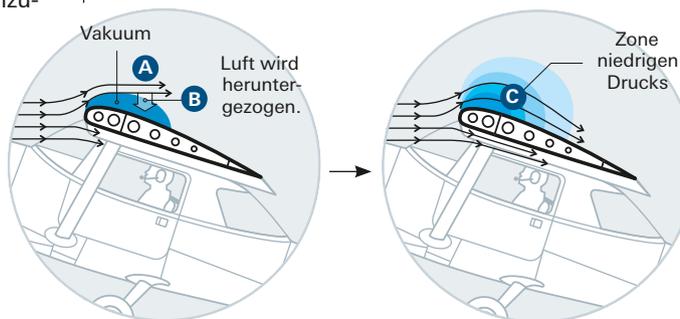
Laut Aerodynamikexperte Doug McLean halten vier Komponenten in einer wechselseitigen Ursache-Wirkungs-Beziehung ein Flugzeug in der Luft. Sie alle gründen auf Newtons zweitem Gesetz, das die beschleunigten Luftmassen mit wirkenden Kräften verknüpft.



Allerdings betont McLean zwar, der niedrigere Druck über und der höhere Druck unter der Tragfläche resultierten daraus, dass sie »komplett von bewegter Luft umströmt« werde. Doch das erklärt nicht, wie es eigentlich zum niedrigen Druck oberhalb kommt.

### Der Ursprung des Sogs

Ein weiterer Fluidmechaniker, Mark Drela, hat einen Ansatz für den Moment, in dem sich der niedrige Druck über der Tragfläche ausbildet: Die Luft strömt einen Augenblick lang horizontal weiter **A**, wodurch eine leere Region entsteht. Dieses Vakuum zieht den Strom herab **B** und gleicht so einen Teil des Unterdrucks aus – aber nicht völlig. Es verbleibt ein Sog, der Luft in den gebogenen Bereich hineinzieht **C**.



»Über diese Frage herrscht vielfach Unklarheit«, schrieb der Physiker. »Ja, ich muß sogar gestehen, daß ich ihrer einfachsten Beantwortung auch in der Fachliteratur nirgends begegnet bin. Ich hoffe daher, manchem Leser ein Vergnügen zu machen, indem ich mit der nachfolgenden kleinen Betrachtung aus der Theorie der Flüssigkeitsbewegungen diesem Mangel abzuhelpen suche.«

Einstein ging dann zu einer Erklärung über, in der er ein ideales, inkompressibles, reibungsloses Fluid annahm. Ohne Bernoulli namentlich zu erwähnen, gab er dessen Prinzip wieder, indem er ausführte, der Flüssigkeitsdruck sei »stets da größer, wo die Geschwindigkeit kleiner ist, und umgekehrt«. Um diese Unterschiede auszunutzen, schlug Einstein ein Profil mit einer »Ausbuchtung« auf der Oberseite vor. Die Form sollte die Luftstromgeschwindigkeit über der Wölbung erhöhen und damit dort den Druck verringern.

Er dachte wohl, seine idealisierte Analyse ließe sich auf reale Flüssigkeitsströmungen übertragen. Jedenfalls entwarf er 1917 auf der Grundlage seiner Arbeit ein Profil, das wegen seiner Form als Katzenbuckelflügel bekannt wurde. Die Luftverkehrsgesellschaft in Berlin konstruierte damit sogar eine Flugmaschine. Diese erwies sich allerdings als völlig unbrauchbar, und der Testpilot Paul Ehrhardt berichtete hinterher, das Flugzeug sei wie »eine schwangere Ente« in der Luft herumgewackelt. Selbst Einstein, der kurz zuvor radikal neue Einsichten in Raum und Zeit gewährt hatte, scheiterte also bei der Suche nach einfachen Ansätzen zum Verständnis des Auftriebs und einem darauf basierenden Tragflächendesign. Viel später, 1954, resümierte er in einem Brief an Ehrhardt über seinen kurzen Ausflug in die Aerodynamik: »Ich muss gestehen, dass ich mich meines damaligen Leichtsinns noch oft geschämt habe.«

Zeitgenössische wissenschaftliche Methoden für den Flugzeugbau sind wesentlich komplexer: Numerische Strömungssimulationen (computational fluid dynamics, CFD) und die fundamentalen Navier-Stokes-Gleichungen berücksichtigen die tatsächliche Viskosität der realen Luft vollständig. Die Lösungen der Gleichungen und die Ergebnisse der CFD-Rechnungen liefern quantitative Ergebnisse und robuste Vorhersagen für die Druckverteilung und die Strömungsmuster. Damit bilden sie die Grundlage für die heutigen hoch entwickelten Flugzeugkonstruktionen.

Im Lauf des letzten Jahrzehnts hat der Aerodynamikexperte Doug McLean versucht, über diesen rein mathematischen Formalismus hinauszugehen und sich mit den physikalischen Ursache-Wirkungs-Beziehungen auseinanderzusetzen, die den Auftrieb in all seinen realen Ausprägungen erklären. Der inzwischen pensionierte McLean hat den größten Teil seiner beruflichen Laufbahn als Ingenieur in der Flugzeugsparte des US-Konzerns Boeing verbracht, wo er auf die Entwicklung von CFD-Codes spezialisiert war. Das Ergebnis seiner Bemühungen war 2012 das Buch »Understanding Aerodynamics«.

Es umfasst mehr als 500 Seiten mit recht anspruchsvollen technischen Analysen, enthält in der zweiten Hälfte aber zudem einen 16-seitigen Abschnitt mit dem Titel »Grundlegende, laienverständliche Erklärung des Auftriebs einer Tragfläche«. Rückblickend meint der Autor, das wäre »wahrscheinlich der am schwierigsten zu schreibende Teil

des Buchs« gewesen. »Es gab mehr Überarbeitungen, als ich zählen kann. Ich war nie ganz zufrieden damit.«

Dabei beginnt McLean mit einer Grundannahme der Aerodynamik: Die Luft um eine Tragfläche verhält sich wie ein zusammenhängendes Material, das den Konturen des Profils folgt und sich dabei verformt. Das führt zu einem weit ausladenden Strom sowohl über als auch unter dem Flügel. »Das Profil beeinflusst den Druck in einem großen Bereich«, beschreibt McLean. »Es bildet sich immer eine diffuse Wolke niedrigen Drucks über dem Profil, dazu kommt gewöhnlich eine diffuse Wolke hohen Drucks darunter. Wo beide Bereiche die Tragfläche berühren, verursacht die Differenz den Auftrieb.«

## In dem Zusammenspiel der Komponenten scheint ein Hauch von Magie zu stecken

McLeans Erläuterung des Auftriebs besteht aus vier Komponenten (siehe »Neue Veranschaulichungen«, links). Einerseits drückt der Flügel die Luft nach unten, lenkt somit den Strom abwärts. Andererseits wird sie über der Tragfläche auseinandergezogen und schneller. Hinzu kommt der hohe Druck unterhalb und der niedrigere oberhalb. Die vier Aspekte treten keinesfalls isoliert auf, sondern es gibt zwischen ihnen eine Beziehung. Diese steht im Mittelpunkt von McLeans Darstellung. Die Teile »rufen einander wechselseitig hervor, und keiner würde ohne den anderen existieren«, schreibt er. »Die Druckunterschiede üben die Auftriebskraft aus, während die abwärts gelenkte Strömung und die Geschwindigkeitsänderung die Druckunterschiede aufrechterhalten.«

### Nicht in der Ruhe – allein in der Bewegung liegt die Kraft

In der Synergie dieses Zusammenspiels scheint ein Hauch von Magie zu stecken. Wie McLean selbst einräumt, hat es etwas von »einem Ursache-Wirkungs-Zirkelschluss«. Wie kann jedes Element der Interaktion alle anderen nähren und verstärken? Und was steckt hinter der dynamischen Wechselseitigkeit? McLean meint: Newtons zweites Bewegungsgesetz.

Das zweite newtonsche Gesetz besagt, dass die Beschleunigung eines Körpers (oder in diesem Fall eines Pakets des strömenden Fluids) proportional zu der auf ihn wirkenden Kraft ist. »Eine Druckdifferenz, die eine Nettokraft auf ein Flüssigkeitspaket ausübt, ändert dessen Bewegungsgeschwindigkeit oder -richtung (oder beides)«, erklärt McLean. Umgekehrt hängt die Druckdifferenz von der Beschleunigung ab und ist nur wegen ihr vorhanden.

Gibt es hier etwa Wirkung zum Nulltarif? McLean verneint das: Würde die Tragfläche ruhen, könnte keine der sich gegenseitig verstärkenden Aktivitäten bestehen. Aber indem sich der Flügel durch die Luft bewegt, ruft er all die Effekte hervor und lässt sie bestehen. Bald nach der Veröffentlichung seines Buchs war McLean allerdings der

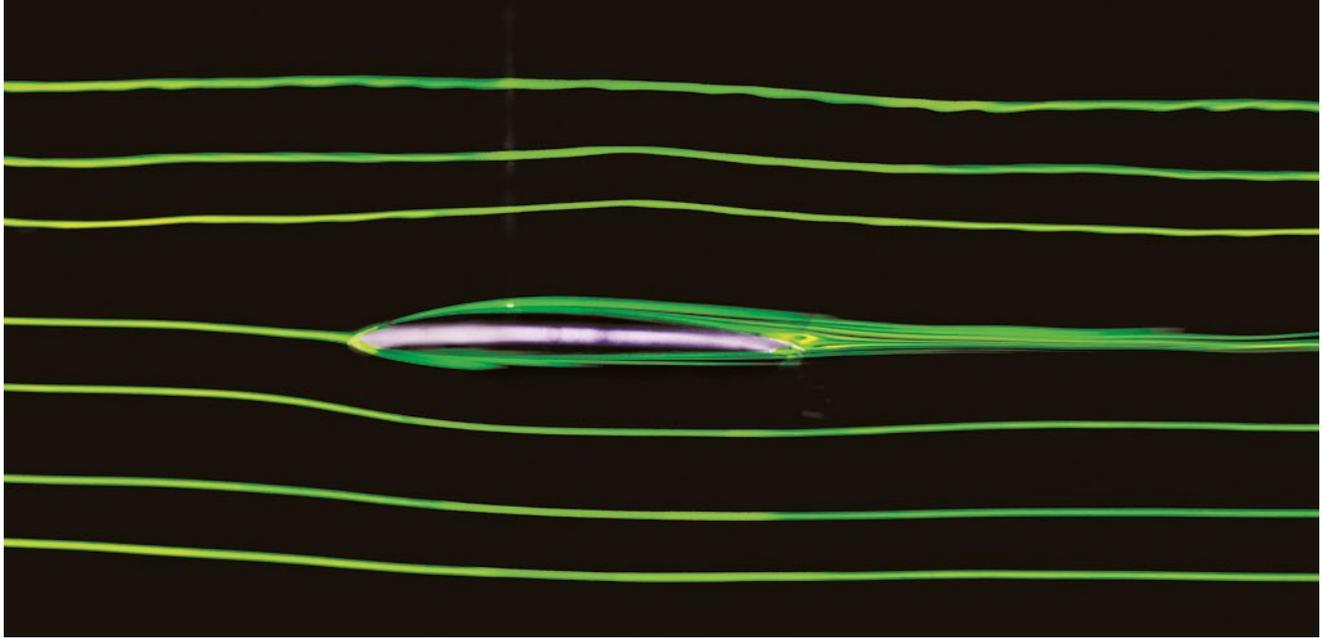


FOTO: IAN ALLEN

**Im Strömungstank trifft Farbstoff auf das Modell eines Tragflächenprofils. Das veranschaulicht die Dynamik bei verschiedenen Neigungen und Geschwindigkeiten.**

Ansicht, nicht überzeugend genug erklärt zu haben, was die Ursache für die ursprüngliche Druckänderung gegenüber den Verhältnissen in Ruhe ist.

Im November 2018 veröffentlichte er einen zweiteiligen Artikel im Magazin »The Physics Teacher«. Dort greift er weitgehend seine frühere Argumentationslinie wieder auf, versucht sich jedoch an einer anderen Herangehensweise hinsichtlich der Gründe für die Uneinheitlichkeit des Druckfelds. Insbesondere führt er eine gegenseitige Wechselwirkung auf der Ebene des Strömungsfelds ein und leitet das ungleichmäßige Druckfeld als das Ergebnis einer Kraft her, nämlich der nach unten gerichteten Kraft durch die Tragfläche auf die Luft.

Freilich bleibt vorerst offen, ob McLeans Bemühungen dazu beitragen werden, populäre Darstellungen des Auftriebs vollständiger und korrekter zu machen. Schließlich gibt es Gründe dafür, warum es schwierig ist, die aerodynamischen Zusammenhänge klar, einfach und befriedigend zu erläutern. Strömungen sind komplexer als die Bewegungen massiver Objekte. Zusätzlich trennen sie sich hier an der Vorderkante einer Tragfläche und sind entlang von deren Ober- und Unterseite unterschiedlichen physikalischen Kräften ausgesetzt. Einige der Kontroversen um die Darstellung des Auftriebs betreffen nicht die Fakten selbst, sondern vielmehr die Art und Weise ihrer Interpretation. Manche Streitpunkte sind durch Experimente unmöglich zu klären.

Ein heikler Bereich ist die Oberseite der Tragfläche. Dort herrscht ein geringerer Druck, der auch Teil der aerodynamischen Auftriebskraft ist. Aber wenn weder das Bernoulli-Prinzip noch das newtonsche Gesetz von Kraft und Gegenkraft dies erklären können – was dann? Von Versuchen in Windkanälen wissen wir, dass die Luftpakete dem Profil des Flügels folgen und dicht über der gekrümmten Oberfläche entlanglaufen. Doch warum? Könnten sie nicht einfach in gerade Linie weiter nach hinten fliegen?

Eine Antwort hat Mark Drela, Professor für Fluidodynamik am Massachusetts Institute of Technology und Autor eines

Buchs über die Aerodynamik von Flugzeugen: »Würden sich die Luftpakete vom Profilverlauf lösen, entstünde unter ihnen buchstäblich ein Vakuum«, erklärt er. »Dieses würde die Luft wieder nach unten saugen, bis sie das Vakuum größtenteils ausfüllt, sich also erneut tangential zur Tragfläche bewegt. Dieser physikalische Mechanismus zwingt die Luft entlang der Tragflächenform. Es verbleibt lediglich ein Teilvakuum, welches die gekrümmte Bahn aufrechterhält.«

Dieses Herunterziehen entfernt die Luftpakete von benachbarten, darübergelegenen und erzeugt den Bereich des niedrigeren Drucks auf der Tragfläche. Mit dem Vorgang geht noch ein weiterer Effekt einher: die höhere Strömungsgeschwindigkeit auf dem Flügel. »Der reduzierte Druck über der Tragfläche zieht gewissermaßen außerdem horizontal an den von vorn einströmenden Luftpaketen. Bei ihrer Ankunft über dem Flügel sind sie dann schneller«, erläutert Drela. »Die erhöhte Geschwindigkeit an der Flügeloberseite ist sozusagen ein Nebeneffekt des dort reduzierten Drucks.«

Wie so oft bei Vereinfachungen haben Experten verschiedene Ansichten. Der Cambridge-Aerodynamiker Holger Babinsky meint: »Ich widerspreche meinem geschätzten Kollegen Mark Drela nur sehr ungern. Aber wenn die Entstehung eines Vakuums genügte, wäre es schwer zu verstehen, warum sich eine Strömung manchmal trotzdem von der Oberfläche trennt.« Drela selbst räumt ein, dass seine Veranschaulichung in mancher Hinsicht unbefriedigend ist: »Offensichtlich finden wir keine Erklärung, die allgemein akzeptiert wird.« Was heißt das für uns? Wir stehen wieder dort, wo wir angefangen haben – bei der Feststellung, dass es keine knappe Antwort gibt. ◀

QUELLEN

**Babinsky, H.:** How do wings work? Physics Education 38, 2003

**Bloor, D.:** The enigma of the aerofoil: Rival theories in aerodynamics, 1909–1930. University of Chicago Press, 2011

**Drela, M.:** Flight vehicle aerodynamics. MIT Press, 2014

**McLean, D.:** Aerodynamic lift, part 1: The science. The Physics Teacher 56, 2018

**McLean, D.:** Understanding aerodynamics: Arguing from the real physics. Wiley, 2012

# Unsere Neuerscheinungen!



Plankton: Motor der Evolution • Symbiose: Teamgeist der Tiefsee • Biskaya: Der Canyon der Wale • Artenschutz: Haiwanderungen auf der Spur • Klimaforschung: Dem Ozean geht die Luft aus • Unterwasserbergbau: Goldrausch in der Tiefe • € 8,90; ab 24.4. 2020



Planetenforschung: Streit um die frühe Erde • Supervulkan: Inferno aus der Tiefe • Klimawandel: Gefährlicher Wetterverstärker • Kohlendioxid: Das Klimagas vergraben • Arktis: Auf dünnem Eis • € 8,90



Lernen & Verhalten: Pawlows Hund • Körperempfindung: Die Gummihand-Illusion • Modelllernen: Wann Kinder Gewalt imitieren • Macht der Gruppe: So leicht manipulieren uns andere • Freier Wille: Entscheidet Ihr Hirn, bevor Sie es tun? • € 8,90



Mikrobiom: Stimmungsmacher im Darm • Psychische Erkrankungen: Papa, warum weinst du? • Partnerschaft: Richtig streiten • Einsamkeit: Die Epidemie, die keine ist • Nachhaltig leben: Was die Psychologie dazu beitragen kann • € 5,90



Kalkriese: War es Varus? • Mecklenburg-Vorpommern: Auf Kriegszug gegen Norden • Lorsch oder Fulda?: Die Markenschmiede der Franken • Mysteriöse Skelette: Wer starb am Knochensee? • Konquista Amerikas: Eine Heimatlose, die ihre Heimat verriet? • € 5,90



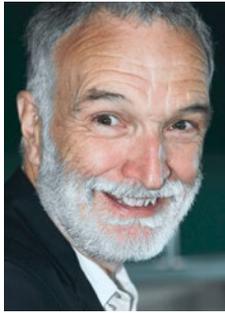
TRAPPIST-1: Lebensfreundlich oder unwirtlich? • CHEOPS: Vermessung ferner Welten • NGTS: Auf der Jagd nach kleinen Exoplaneten • Heiße Jupiter: Frühes Ende für Gasriesen • TESS: Spannende erste Funde • € 5,90

**Hier bestellen:**

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

[www.spektrum.de/shop](http://www.spektrum.de/shop)

# SCHLICHTING! WIE TAU PFLANZEN TRÄNKT



**Einige Pflanzen schöpfen lebenswichtige Feuchtigkeit direkt aus der Luft, indem Wasserdampf an ihren spezialisierten Blättern kondensiert. Winzige Rillen auf deren Oberfläche lassen kleine Tropfen zu großen zusammenfließen und zu Boden fallen.**

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/1714804](https://www.spektrum.de/artikel/1714804)

## Die Tropfen Tau schon rinnen, auf uns und über uns

Achim von Arnim (1781–1831)

Bei einem Regenschauer suchen wir Schutz unter Bäumen, denn das Blätterdach hält den Boden trocken. Gelegentlich allerdings verhält es sich gerade umgekehrt, vor allem am Morgen – dann ist es nur rund um den Stamm nass. Dieses sonderbare Phänomen ist sogar von großer ökologischer Bedeutung. In niederschlagsarmen Gebieten der Erde trägt es maßgeblich zur Wasserversorgung mancher Pflanzen bei.

Bei Nebel kommt man den Ursachen schnell auf die Spur. Ein Teil der durchziehenden Schwaden bleibt an den Blättern der Bäume hängen. Die winzigen Tropfen vereinigen sich mit nachfolgenden und fallen schließlich auf Grund der eigenen Schwere ab.

Doch manchmal findet man frühmorgens selbst nach einer klaren Nacht ohne Anzeichen von Nebel trotzdem feuchte Stellen unter manchen Pflanzen. Dann verdankt sich die Wassergewinnung aus dem vermeintlichen Nichts einem anderen Effekt: Auf den Blättern der Bäume bildet sich Tau. Wenn es nachts kälter wird, nimmt die maximal mögliche Wasserdampfkonzentration ab. Sie sinkt dabei oft unter die tatsächlich vorhandene Feuchtigkeit – der so genannte Taupunkt wird unterschritten.

Die Blätter der Pflanzen kühlen sich schnell ab, denn sie haben wenig Masse und daher eine geringe Wärmekapazität. Als Folge ihrer eigentlichen Funktion, tagsüber möglichst viel Sonnenlicht einzufangen, sind sie nachts ebenso optimal zum kalten Weltall ausgerichtet und geben an dieses Energie durch Wärmestrahlung ab.



H. JOACHIM SCHLICHTING



**Die langen Nadeln der Kanarischen Kiefern sind ideale Wassersammler. Selbst bei leichtem Nebel oder Taubildung fangen sie winzige Tropfen ein und leiten diese zum Wurzelbereich.**



Auf einem Kohlrabiblatt nimmt der große Tropfen in der Rinne der Blattader beim Abgleiten kleinere mit. Diese wären von sich aus nicht in Bewegung gekommen.

PH. JOACHIM SCHLICHTING

Damit sich Wasserdampf absetzen kann, sind zusätzlich zur Unterschreitung des Taupunkts Kondensationskeime nötig. Winzige Oberflächenstrukturen und Verunreinigungen bieten davon reichlich. Sobald an den Stellen Minitröpfchen entstanden sind, wachsen diese zügig, denn sie sind perfekte Orte für weitere Kondensation.

Schließlich neigen sich die Blätter. Meist sind sie ohnehin nicht waagrecht ausgerichtet, und selbst wenn, verbiegt sie die zunehmende Last. Die Schwerkraft lässt die Tropfen herabgleiten und zu Boden fallen. Das geschieht aber erst bei einer kritischen Größe.

### Rasches Abperlen dank abweisender Oberflächen

Diese hängt einerseits von der Benetzbarkeit der Blätter ab, also der Adhäsionskraft, mit der Wasser daran haftet. Der Wert dafür lässt sich mit Hilfe des so genannten Kontaktwinkels bestimmen. Das ist die Neigung zwischen dem Rand der gekrümmten Oberseite eines Tropfens und der Blattoberfläche (siehe Illustration unten). Bei einem spitzen Winkel ist der Untergrund hydrophil (Wasser liebend), bei 90 bis 180 Grad ist er hydrophob (Wasser abweisend). Im letzteren Fall können sich bereits relativ kleine Tropfen ablösen. Das ist der berühmte Lotoseffekt, der sich hier zu Lande auch bei Kapuzinerkresse oder bei Kohlrabi beobachten lässt (siehe Foto oben).

Andererseits ist die Voraussetzung für das Herunterfallen eine ausreichende Neigung der Blätter. Denn mit ihr wächst die Komponente der Schwerkraft, die für das Hinabkullern entscheidend ist. Da die Belastung durch das sich sammelnde Wasser das Blatt krümmt, kommt es zu einer Art Rückkopplung: Je mehr Tropfen entstehen und je größer sie werden, desto eher lösen sie sich ab.



Je wasserabweisender eine Unterlage ist, desto größer ist der Kontaktwinkel eines darauf liegenden Tropfens.

Die Vorgänge kommen morgens zum Erliegen, wenn mit steigender Umgebungstemperatur die maximal erreichbare Feuchte wieder zunimmt. Dann erhöht sich der Taupunkt, und die Neigung zur Kondensation sinkt. Schließlich überwiegt die Verdunstungsrate, so dass die letzten Wasserrückstände allmählich verschwinden. Um bis dahin möglichst viel Feuchtigkeit zu den Wurzeln zu leiten, sollten die Tropfen rasch zu Boden gehen und Platz für neue machen. Falls die Pflanze auf diese Versorgung angewiesen ist, sollten sie deswegen idealerweise schnell auf das kritische Volumen zum Abgleiten kommen.

Zu Beginn wachsen einmal entstandene Tropfen jeder für sich. Zwei kleine verschmelzen erst dann zu einem großen, wenn sie sich zufällig berühren. Der Menge an herabrieselndem Wasser würde demnach zunehmen, wenn solche Vereinigungen öfter und zielgerichteter vorkämen. Die kanarische Kiefer etwa hat dafür besonders lange und schmale Nadeln entwickelt – eine fast eindimensionale Struktur. Die Tropfen kommen daher wesentlich rascher mit Nachbarn in Kontakt als bei einem ungerichteten Wachstum in der Fläche.

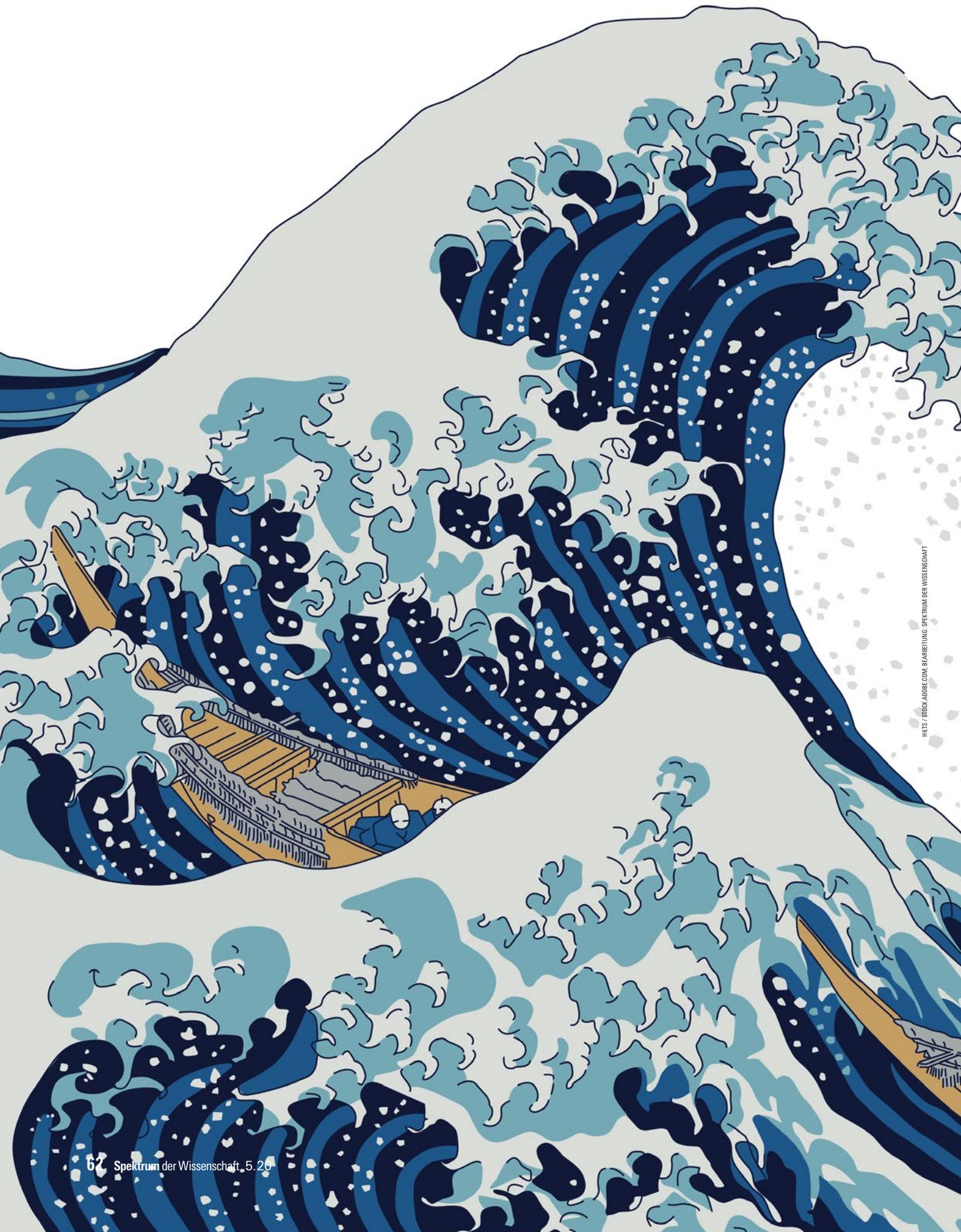
Auf den sehr biegsamen Nadeln geraten die Tropfen bald ins Gleiten und reißen auf dem Weg herab kleinere Exemplare mit. Und zwar nicht nur einige weitere, zufällig auf ihrer Bahn liegende, wie es auf einem flächenhaften Blatt der Fall wäre, sondern gleich alle, die sich unterhalb von ihnen befinden. Auch andere Pflanzen bieten eine solche anisotrope Topografie, etwa der Bambus. Dieser verfügt über in Längsrichtung geordnete Blattadern. Sie begünstigen schmale, elliptisch geformte Wassertröpfchen und führen sie gezielt hinab.

Die Idee, durch eine derartige Strukturierung Flüssigkeit effektiver aus Dampf zu produzieren, fasziniert Wissenschaftler schon länger. Sie wollen mit maßgeschneiderten Oberflächen unter anderem in Wüsten Trinkwasser gewinnen. 2019 hat eine französische Forschergruppe von einer Möglichkeit berichtet, auch kleinere Tropfen in Bewegung zu versetzen und ablaufen zu lassen, die normalerweise wieder verdunsten würden.

Das Team um Pierre-Brice Bintein von der Université Paris Diderot hat dazu mikroskopisch kleine Rillen auf Materialien aufgebracht. Daraufhin floss kondensiertes Wasser wesentlich leichter ab als auf glatten Flächen. Die Tropfen verschmelzen eher zu einer kritischen Größe, und auf dem Substrat verbleiben weniger Rückstände. Wenn es Ingenieuren gelingt, solche Strukturen großflächig und günstig herzustellen, ließe sich nicht nur mehr Nebel und Wasserdampf in Wüsten ernten, sondern außerdem die Entwässerung in anderen Systemen verbessern, bei denen die Schwerkraft eine Rolle spielt, von der Destillation bis zum Wäschetrockner.

### QUELLE

Bintein, P.-B. et al.: Grooves accelerate dew shedding. Physical Review Letters 122, 2019



HEITS / STOCK.AUDIENCE.COM - BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

# OZEANE MONSTERWELLEN AUF DER SPUR

Seit Jahren streiten Wissenschaftler darüber, wie die rätselhaften Giganten des Meeres entstehen, die schon etlichen Menschen das Leben gekostet haben. Ein neuer Ansatz aus der Wahrscheinlichkeitstheorie könnte Monsterwellen nun vorhersagen – unabhängig davon, was sie verursacht.

Charlie Wood arbeitet als Wissenschaftsjournalist in den USA. Er schreibt unter anderem für »Scientific American« und das »Quanta Magazine«.



» [spektrum.de/artikel/1714790](https://spektrum.de/artikel/1714790)

»Die große Welle vor Kanagawa« von Katsushika Hokusai (1760–1849) ist eines der bekanntesten Werke japanischer Kunst. Es zeigt drei Boote, die von der ehemaligen japanischen Hauptstadt Edo kommen und versuchen, sich gegen eine Riesenwelle zu behaupten. Im Hintergrund ist der Fuji zu sehen.

PHOTOS: STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



► Zwei Wochen vor Weihnachten 1978 geriet das westdeutsche Frachtschiff »München« im Nordatlantik in einen heftigen Sturm. Die vorhergesagten Wellen und Winde sollten aber eigentlich keine Gefahr für den 261 Meter langen Frachter darstellen. Beunruhigt war die Besatzung daher nicht; um Mitternacht funkte eines der Mitglieder noch ein deutsches Kreuzfahrtschiff an und schloss die lockere Konversation mit: »Gute Reise und bis bald!«

Drei Stunden später sah die Lage plötzlich völlig anders aus. Von der »München« ging ein Notruf aus, darauf folgte nur noch Schweigen. Das Schiff und seine 28-köpfige Besatzung verschwanden spurlos. Man konnte bloß vier Rettungsboote, drei Schiffscontainer und eine Hand voll Schwimmhilfen bergen.

Als Ermittler den Fall untersuchten, verblüffte sie ein Detail ganz besonders. Eines der Rettungsboote war ursprünglich etwa 20 Meter über dem Wasser an der »München« mit Metallbolzen festgeschraubt worden. Es musste daher eine gewaltige Kraft auf das Heck des Schiffs gewirkt haben, um das Boot von seinem Platz zu reißen. Dass eine Welle dafür verantwortlich sei, konnte niemand glauben, denn ein solcher Seegang war zu diesem Zeitpunkt undenkbar. Die Bundesmarine erklärte schließlich die Ursache des Untergangs für ungeklärt.

Seit Jahrhunderten behaupten Seeleute, dass der Ozean ein weitaus gefährlicherer Ort ist, als es der gesunde Menschenverstand vermuten lässt. Einer der Gründe dafür seien so genannte Monsterwellen, riesige Brecher, die aus der Meeresdecke deutlich hervorstechen. Lange taten Wissenschaftler solche Geschichten als Seemannsgarn ab. Denn wie die menschliche Körpergröße variiere auch die Höhe von Wellen gemäß statistischer Gesetze: Es gibt einen

**Diese gigantische Monsterwelle wurde vom Deck eines Schiffs im westlichen Atlantischen Ozean vor der Küste von North Carolina in den Vereinigten Staaten fotografiert.**

Mittelwert, um den sich vergleichsweise geringe Abweichungen gruppieren. Theoretisch könnte durchaus eine Welle entstehen, die alle umgebenden um das Doppelte überragt, doch ein solches Ereignis galt als extrem unwahrscheinlich.

Am Neujahrstag 1995 wurden die Forscher eines Besseren belehrt. Damals konnten sie mitverfolgen, wie eine Monsterwelle auf die norwegische Ölbohrplattform Draupner-E in der Nordsee traf. Ausgestattet mit einem nach unten gerichteten Laser registrierte die Plattform einen 26 Meter hohen Brecher, während die übrigen Wellen höchstens 11,8 Meter erreichten. An diesem Tag wurde der maritime Mythos über die Giganten der See zu einer wissenschaftlichen Tatsache. Forscher schätzen inzwischen, dass Monsterwellen allein in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wahrscheinlich 22 Frachtschiffe untergehen ließen und mehr als 500 Menschenleben forderten.

Um sich vor solchen einsamen Ausreißern zu schützen, versuchen Physiker zu verstehen, was genau die seltenen Phänomene verursacht. »Man könnte erwarten, dass Monsterwellen auf viele verschiedene Arten entstehen«, sagt der Mathematiker Eric Vanden-Eijnden vom Courant Institute of Mathematical Sciences der New York University. »Doch das stimmt nicht.« Tatsächlich konnten Forscher zwei grundlegende Mechanismen ausmachen, die – zumindest in Laboren – zu Monsterwellen führen (siehe »Die Entstehung von Monsterwellen«, rechts). Seither streiten sie darüber, welche der beiden Theorien im Ozean wirklich ausschlaggebend ist.

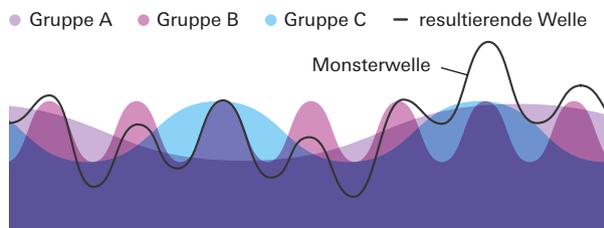
Wellen breiten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus und überholen sich daher gelegentlich. Überlappen sich dadurch mehrere davon an derselben Stelle, entsteht eine Monsterwelle, so die Forscher aus dem ersten Lager. Dabei bewegen sich die einzelnen kleineren Wellen stets unabhängig voneinander, weshalb man von einem linearen Ansatz spricht. Ozeanografen verwenden diese Theorie schon lange, um die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, auf eine Welle bestimmter Höhe zu treffen. Allerdings

## Die Entstehung von Monsterwellen

Es gibt zwei Ansätze, die erklären, wie sich riesige Brecher bilden. Der erste geht davon aus, dass sich einzelne Wellen im Meer einfach aufaddieren und so eine Monsterwelle formen. Verfechter des zweiten Ansatzes vermuten dagegen, dass Wellen auf kompliziertere Weise miteinander wechselwirken.

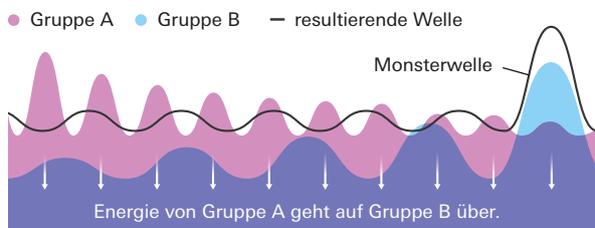
### Lineare Addition

Unabhängige Wellengruppen breiten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus. Dabei kann es immer wieder passieren, dass sich sehr viele an einem Punkt überlappen und so eine Monsterwelle entsteht.



### Nichtlineare Fokussierung

Wellen können miteinander wechselwirken, indem sie beispielsweise untereinander Energie austauschen. Das kann unter bestimmten Umständen zu Monsterwellen führen.



sagt dieser Ansatz weitaus weniger Monsterwellen voraus, als man in der Realität beobachtet. Einige Forscher versuchen das Modell zu retten, indem sie Wellen nicht als glatte Sinuskurven behandeln, sondern spitze Wellenberge und abgerundete Täler in den Gleichungen berücksichtigen.

### Schrödingergleichung für den Ozean

Andere Wissenschaftler sind jedoch der Meinung, dass die extremen Brecher auf andere Weise entstehen. Wenn eine Welle in einem Kanal direkt neben einer anderen verläuft, tauschen sie Energie aus. Dadurch beeinflussen sie sich auf komplizierte, nichtlineare Weise. Das lässt sich durch die nichtlineare Schrödingergleichung beschreiben, dem Standardmodell der Ozeanografie – die Verbindung zur Quantentheorie ist kein Zufall, denn subatomare Teilchen verhalten sich oftmals wie Wellen. In den meisten Fällen kann man die Gleichung nicht exakt lösen, doch Computersimulationen zeigen, dass bestimmte Bedingungen Wellen dazu bringen, sich zu häufen, wodurch gewaltige Brecher entstehen.

Diese Häufungen würden aber nur in Kanälen auftreten, entgegenen Unterstützer der ersten Theorie, weil die Wellen dort – anders als im Ozean – räumlich begrenzt sind. Wissenschaftler aus dem zweiten Lager erwidern, dass bestimmte Winde Bedingungen wie in Kanälen herstellen und so Brutstätten für Monsterwellen schaffen. Man wisse zudem schlichtweg noch zu wenig über den Ozean, um eine sichere Aussage zu treffen.

Inzwischen gehen die meisten Forscher davon aus, dass beide Mechanismen relevant sind. »Nachdem wir hunderte wissenschaftliche Arbeiten ausgewertet haben, sind wir zu dem Schluss gekommen, dass der vorherrschende Mechanismus von der Situation abhängt«, sagt der Physiker Amin Chabchoub von der University of Sydney. Der lineare Ansatz erkläre zwar einige Monsterwellen, unterschätze aber deren Wahrscheinlichkeit unter bestimmten Umständen, bei denen offenbar nichtlineare Effekte vorherrschen. In

einigen Fällen könnten sogar beide Mechanismen gemeinsam eine Rolle spielen.

Anstatt sich einer Seite in dem Disput anzuschließen, wählte eine Gruppe von angewandten Mathematikern einen anderen Weg. Die Forscher um Vanden-Eijnden können nun berechnen, wie wahrscheinlich eine Monsterwelle auftritt, unabhängig davon, wie sie entstanden ist. Sollte sich ihre Methode bewähren, könnte das Geräte ermöglichen, die zum Beispiel die Meeresoberfläche abtasten und Schiffskapitänen mitteilen, dass sie in den nächsten 15 Minuten mit 13-prozentiger Wahrscheinlichkeit auf eine 30 Meter hohe Welle stoßen werden.

Der Hauptgedanke bestehe darin, so Vanden-Eijnden, dass extrem seltene Ereignisse einer eigenen Logik folgen. Ein Kasino sollte zum Beispiel immer genügend Bargeld vorrätig haben, um einen Spieler auszuzahlen, der dreimal hintereinander die richtige Zahl beim Roulette gesetzt hat.

## AUF EINEN BLICK GIGANTEN DES MEERES

- 1** Lange galten Monsterwellen als Seemannsgarn: Riesige Brecher, die um ein Vielfaches höher sind als benachbarte Wellen, hielten Wissenschaftler für unrealistisch.
- 2** Mittlerweile konnten Forscher aber einige dieser seltenen Ereignisse aufzeichnen und versuchen seither herauszufinden, was sie verursacht.
- 3** Nun haben Mathematiker ein statistisches Modell entwickelt, das Monsterwellen unabhängig von ihrer Entstehung zuverlässig vorhersagen soll.



## Kurz erklärt: Theorie der großen Abweichungen

Die Theorie der großen Abweichungen widmet sich den unwahrscheinlichsten Ereignissen – also dem langen Rattenschwanz einer Verteilungskurve, den man häufig ignoriert. Dazu untersuchen Mathematiker das asymptotische Verhalten der seltenen Ereignisse, das heißt, wie die Verteilung in diesem äußeren (also vom Erwartungswert weit entfernten) Abschnitt verläuft. Das ermöglicht es ihnen, eine so genannte Ratenfunktion einzuführen, welche die Wahrscheinlichkeit für ein seltenes Ereignis angibt. Diesen Ansatz verwenden beispielsweise Versicherungen, um den jährlichen Beitrag ihrer Kunden festzulegen. Denn durch die Theorie der großen Abweichungen können sie abschätzen, wie häufig welche seltenen Versicherungsfälle vermutlich auftreten werden, und sicherstellen, dass sie dabei immer noch einen Gewinn erwirtschaften.

ten in den meisten von Onoratos Versuchen keine Monsterwellen auf, dennoch konnte er insgesamt etwa 300 davon beobachten. Und tatsächlich folgten sie genauestens den theoretischen Vorhersagen – unabhängig davon, ob sie sich eher linear oder eher nichtlinear bilden.

Die Fähigkeit, das schlimmste Szenario abzuschätzen, ist genau das, wovon Ozeanografen schon lange träumen. Momentan verlangen viele Versicherungen, Schiffe und Ölplattformen vorab in Wellenkanälen zu testen, was sehr teuer ist. Durch das statistische LDT-Modell könnte man weniger dieser langwierigen Versuche benötigen.

Einige Forscher zeigen sich jedoch wenig begeistert von der neuen Arbeit. Zum Beispiel behauptet Francesco Fedele vom Georgia Institute of Technology, dass er bereits 2007 ein ähnliches Ergebnis veröffentlicht habe, in dem er einen statistischen Ansatz des Ozeanografen Paolo Boccotti erweitert hatte. Die Autoren des jüngsten Aufsatzes entgegneten, ihre Resultate würden das nichtlineare Verhalten von Wellen vollständiger erfassen.

Ihre Methode hat allerdings Grenzen: Sie ignoriert bestimmte Effekte wie Strömungen und Winde, wodurch die simulierten Wellen unaufhaltsam anwachsen. Das liegt an der nichtlinearen Schrödingergleichung, die solche Phänomene ebenso wenig berücksichtigt.

Die Forscher sind trotzdem von ihrem Modell überzeugt. Man könne aus ihrer Sicht die NLSG gegen realistischere Wellentheorien austauschen. »Es ist, als ob man ein Auto baut«, erklärt Vanden-Eijnden. »Wenn man es einmal gemacht hat, kann man andere Fahrzeuge auf die gleiche Weise herstellen.« Zuallererst werden die Forscher versuchen, ihr Modell auf Situationen zu erweitern, in denen sich Wellen im offenen Ozean unbegrenzt ausbreiten können, anstatt sich auf Wellenkanäle zu beschränken.

Während die Theoretiker an ihren Werkzeugen herumbasteln, bereitet sich Onorato auf den nächsten experimentellen Schritt vor: Wellen präziser zu untersuchen. Bojen und Laser können bloß das Auf- und Abtauchen eines einzelnen Punkts messen, wodurch sich kaum zwischen linearer und nichtlinearer Bildung unterscheiden lässt. »Wir wissen nicht, wie eine Welle einen Kilometer vorher aussah und wie sie sich entwickeln wird«, sagt Onorato.

Um das Meer in seiner ganzen Vielfalt einzufangen, klebte er zwei Kameras an das Oberdeck eines Eisbrechers, der 2017 über das stürmische Südpolarmeer von Kapstadt bis zur Antarktis reiste. Zusammen mit zwei Kollegen sammelte er zwei Wochen lang Daten. In dieser Zeit traf sie ein starker Zyklon. »Jedes Mal, wenn wir hinausgingen, um in die Kamera zu schauen oder den Bildschirm zu säubern, hatten wir Angst, weggeblasen zu werden«, erinnert sich der damals anwesende Ozeanograf Alessandro Toffoli von der University of Melbourne.

Momentan kämpfen sich die Forscher durch sieben Terabyte an Daten, die sie aufgezeichnet haben. Dazu müssen sie mühsam jede ruckartige Bewegung des Boots kompensieren. Bisher konnten sie bloß einen vorläufigen Blick auf das Wasser kurz vor Beginn des Zyklons werfen, doch der nichtlineare Ansatz scheint an diesem Tag eine Schlüsselrolle bei der Wellenbildung gespielt zu haben. Onorato prüft derzeit, ob die LDT-Methode auch in der Antarktis funktioniert. »Bisher sieht es viel versprechend aus«, meint er.

Allerdings haben Segler angesichts eines drohenden Sturms keine Zeit, die wachsenden Wellen um sie herum ausführlich zu studieren. Der LDT-Ansatz könnte jedoch zu neuartigen technischen Geräten führen, die fortlaufend den Ozean absuchen und bei Risiko Alarm schlagen. Im besten Fall ließe sich dadurch künftig verhindern, dass sich das traurige Schicksal der »München« und ihrer Besatzung wiederholt. ◀

### QUELLEN

**Dematteis, G. et al.:** Experimental evidence of hydrodynamic instants: the universal route to rogue waves. *Physical Review X* 9, 2019

**Dudley, J. M. et al.:** Rogue waves and analogies in optics and oceanography. *Nature Reviews Physics* 1, 2019

**Dysthe, K. et al.:** Oceanic rogue waves. *Annual Review of Fluid Mechanics* 40, 2008

**Fedele, F.:** Explaining extreme waves by a theory of stochastic wave groups. *Computers & Structures* 85, 2007

**Fedele, F. et al.:** Real world ocean rogue waves explained without the modulational instability. *Scientific Reports* 6, 2016

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »The Grand Unified Theory of Rogue Waves« 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.





SERIE

**Die Röntgen-Revolution**

Teil 1: Mai 2020

**Als die Welt durchsichtig wurde**  
Dirk Eidemüller

Teil 2: Juni 2020

**Röntgentechnik in der Medizin**  
Emmanuelle Vaniet

Teil 3: Juli 2020

**Röntgenastronomie**  
Belinda J. Wilkes

**Das Bild entstand  
während der ersten  
Vorstellung der Technik  
und zeigt die Hand  
von Albert von Kölliker.**

# RÖNTGENSTRAHLUNG ALS DIE WELT DURCHSICHTIG WURDE

**Wilhelm Röntgen entdeckte durch Zufall eine unsichtbare Strahlung, die fast jede Art von Materie durchdringen kann. Damit revolutionierte er verschiedenste wissenschaftliche Bereiche, von der Physik bis hin zur Medizin, wo Röntgenuntersuchungen bis heute nicht wegzudenken sind.**



**Dirk Eidemüller** ist Wissenschaftsjournalist und Buchautor zu den Themen Kernenergie und Naturphilosophie.

► [spektrum.de/artikel/1714794](https://spektrum.de/artikel/1714794)

► Ende des 19. Jahrhunderts hatte kaum jemand mehr einen wissenschaftlichen Durchbruch von Wilhelm Conrad Röntgen erwartet. Der Würzburger Physikprofessor galt unter seinen deutschen Kollegen zwar als begabter und gewissenhafter Experimentator, international war er aber ein unbeschriebenes Blatt. Zudem wurde er 1895 50 Jahre alt – die meisten Forscher machen ihre bedeutendsten Entdeckungen jedoch in jüngeren Jahren.

Röntgen verfügte auch schulisch gesehen nicht über die besten Voraussetzungen. Als seine Klasse 1863 einen Lehrer unvorteilhaft karikierte, regte dieser sich stark darüber auf, doch niemand wollte sich schuldig bekennen. Schließlich übernahm Röntgen die Verantwortung, um alle zu beruhigen – und wurde kurzerhand der Schule verwiesen. Ohne schulischen Abschluss konnte er nicht studieren und nahm deshalb als Gasthörer an Vorlesungen teil. Erst über Umwege gelang es ihm, in der Schweiz zu promovieren und anschließend an der Universität Würzburg zu arbeiten.

Am 8. November 1895 werkelte er dort wieder einmal allein in seinem Labor herum. Röntgen widmete sich einer so genannten Kathodenstrahlröhre, die ein eigentümliches Leuchten von sich gab. Solche Vakuumröhren, in denen Elektronen mit hoher elektrischer Spannung beschleunigt werden, waren erst wenige Jahre im Umlauf. Auf dieser Technik basierten später unter anderem Röhrenfernseher, die bis zum Einzug der Halbleitertechnik unzählige Wohnzimmer bevölkerten. Als Röntgen an diesen Geräten arbeitete, waren Elektronen als Elementarteilchen noch unbe-

kannt, weshalb Wissenschaftler wie er untersuchten, was die Röhren zum Leuchten bringt.

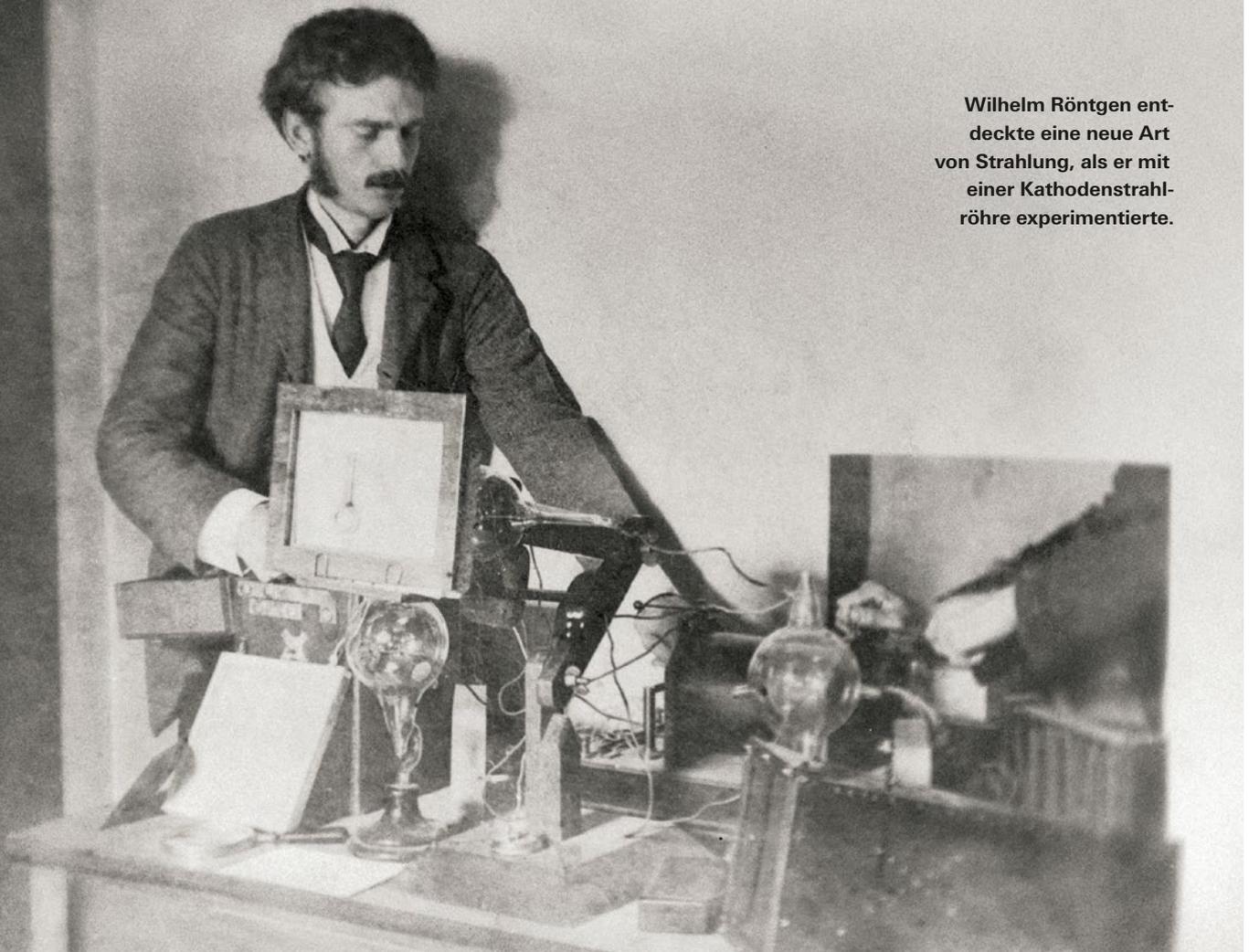
An diesem Tag bemerkte der Physiker in seinem abgedunkelten Labor etwas Ungewöhnliches: Wenn das Gerät eingeschaltet war, fing ein in der Nähe befindliches Papier, das er zuvor mit fluoreszierender Farbe beschichtet hatte, ebenfalls an zu leuchten. Daraufhin dunkelte er die Vakuumröhre ab, indem er sie mit schwarzer Pappe umschloss, doch das Leuchten blieb weiterhin bestehen. Von der Kathodenstrahlröhre musste also irgendeine unsichtbare Strahlung ausgehen!

Fasziniert von diesem Ergebnis experimentierte Röntgen wochenlang ausgiebig mit den neuartigen Geräten. Metallstücke schienen die ausgesandten Strahlen zu blockieren, während leichte Materialien wie Holz sie offenbar kaum beeinflussten. Je nach Bleigehalt ließ Glas die Strahlung besser oder schlechter passieren. In dieser Zeit führte Röntgen so viele umfangreiche Experimente durch, dass

## AUF EINEN BLICK DURCHLEUCHTETE MATERIE

- 1** Als Wilhelm Röntgen 1895 die nach ihm benannten Strahlen entdeckte, befürchtete er zunächst, dass ihm niemand glauben würde.
- 2** Schnell verbreitete sich die Nachricht von der Strahlung, die alles durchdringt. Weil der Forscher auf Patente verzichtete, hielten Röntgengeräte bereits binnen kürzester Zeit Einzug in die Medizin.
- 3** Röntgen wurde der Rummel um seine Person zu viel, weshalb er sich nur noch selten in der Öffentlichkeit zeigte und anderen Forschungsthemen zuwandte.

Wilhelm Röntgen entdeckte eine neue Art von Strahlung, als er mit einer Kathodenstrahlröhre experimentierte.



GETTY IMAGES / TIME & LIFE PICTURES

andere Forscher in den folgenden Jahren kaum noch etwas Neues in diesem Bereich herausfanden. Dennoch scheute er sich anfangs davor, mit anderen Personen als seiner Frau Bertha über seine Versuche zu sprechen – zu unglaublich schien ihm sein Fund.

### Ehefrau als Versuchskaninchen

Wie er bald feststellte, reagieren auch gewöhnliche Filmplatten auf die mysteriösen Strahlen. Das ermöglichte es ihm, Bilder aufzunehmen. Und gleich das erste ging in die Wissenschaftsgeschichte ein: Er durchleuchtete die Hand seiner Frau, die dafür etwa eine Viertelstunde lang vollkommen stillhalten musste. Auf diesem Röntgenbild lässt sich das Gewebe nur schemenhaft erkennen, wohingegen die Handknochen deutlich hervorstechen. Am markantesten erscheint aber Berthas Ehering, denn Metall absorbiert die Strahlung viel stärker als Haut oder Knochen. Wilhelm war begeistert. Seine Frau war von dem Bild allerdings weniger angetan. »Ich habe meinen Tod gesehen«, entfuhr es ihr angesichts der Knochen ihrer Hand.

Am 28. Dezember 1895 reichte Röntgen eine erste wissenschaftliche Veröffentlichung zu den neuen Strahlen ein. Dank seines Vertrauten Franz Exner, Physik-Ordinarius in Wien und Sohn eines Zeitungsherausgebers, gelangte die Kunde der geheimnisvollen Strahlen schnell an die Presse. Im Januar 1896 verbreitete sich die Nachricht wie ein Lauffeuer rund um die Welt: Ein Professor namens

Wilhelm Röntgen aus der beschaulichen Universitätsstadt Würzburg habe Strahlen entdeckt, mit denen man durch den menschlichen Körper und andere Objekte hindurchsehen könne. Zeitungen berichteten darüber anfangs noch ohne Bilder, dafür teils mit skeptischem Unterton. Die sich dadurch ergebenden Möglichkeiten schienen zu schön, um wahr zu sein.

»Die Presse« aus Wien meldete beispielsweise am 5. Januar 1896 auf der Titelseite: »Eine sensationelle Entdeckung«. Im Artikel hieß es aber auch, dass Strahlen, die alles durchdringen, »wie ein Märchen oder ein verwegener Aprilscherz klingen. Wir betonen ausdrücklich noch einmal, dass die Sache von ernsten Gelehrten ernst genommen wird.« Die britische Tageszeitung »The Guardian« titelte »A really sensational discovery«. Auch der Londoner »Standard« versicherte seinen Lesern, dass es sich dabei nicht um einen Witz handle.

Bald erschienen die ersten Bilder von Röntgenaufnahmen, was auch die letzten Zweifler überzeugte. Journalisten spekulierten über die vielen Anwendungen, die sich dadurch ergeben könnten, vor allem im medizinischen Bereich. Im Rückblick ist es erstaunlich, wie nahe diese frühen Vermutungen an der Realität liegen. Noch heute untersucht man Knochenbrüche oder lokalisiert Fremdkörper wie vorhergesagt mit Hilfe von Röntgenstrahlung.

Während die Nachricht von den neuen Strahlen um die Welt ging, wuchs auch Röntgens Ruhm täglich weiter an.

Gerade einmal acht Tage nachdem er seinen Aufsatz veröffentlicht hatte, lud Kaiser Wilhelm II. ihn dazu ein, ihm seine neue Technik persönlich vorzuführen. Darauf folgten reihenweise weitere Einladungen zu öffentlichen Vorträgen, die Röntgen aber sämtlich ablehnte.

Am 23. Januar präsentierte er seine Arbeit schließlich an der Universität Würzburg. Noch bevor er anfangen konnte zu sprechen, gab es im bis auf den letzten Platz belegten Saal stehende Ovationen. Als er schließlich um einen Freiwilligen unter den Zuschauern bat, traute sich der 78-jährige bekannte Physiologe Albert von Kölliker nach vorne. Auch seine Fingerknochen samt Ehering erschienen im Röntgenlicht (siehe Bild S. 68). Der Vortrag war ein riesiger Erfolg, und Berichte darüber gab es in allen wichtigen Zeitungen. Dem Forscher zu Ehren hießen die Strahlen, die er selbst bis dahin X-Strahlen genannt hatte, von nun an Röntgenstrahlen.

Außergewöhnlich schnell fand seine Entdeckung technische Anwendungen. Schon 20 Tage nach den ersten Berichten bot eine Berliner Firma Röntgenröhren zum Verkauf an. Nach nicht einmal einem Jahr hatten medizinische Einrichtungen weltweit Röntgenuntersuchungen im Programm. Danach entstanden die ersten Bewegtbilder im Röntgenlicht, die man nutzte, um den menschlichen Sprachapparat zu analysieren. Auch in Ölgemälden alter Meister fand man dank der Röntgentechnik verborgene Bilder.

Findige Geschäftsleute versuchten mit der neuen Technologie Geld zu machen: In Städten wie New York gab es »bone portrait studios«, in denen man seine Knochen fotografieren lassen konnte, um sich solche Bilder zu Hause an die Wand zu hängen. Es gab sogar röntgendichte Unterwäsche, mit denen man sich vor den Blicken von Personen mit angeblichen Röntgenbrillen schützen konnte. Die neuartigen Strahlen sollten zudem Kopfschmerzen heilen, asthmatische Anfälle lindern oder Pickel und unerwünschte Haare entfernen.

### Erste Strahlentherapie in Sicht

Ein Arzt in Chicago versuchte bereits wenige Tage nach Röntgens Vortrag 1896, den Brustkrebs einer Patientin mit Röntgenstrahlen zu behandeln, und erzielte dabei sogar gewisse Erfolge. Die Strahlentherapie begann also etwa zeitgleich mit den Röntgenuntersuchungen, brauchte aber viel länger, bis sie sich durchsetzte.

Nachdem die Welt die ersten Dampflokomotiven, Telegrafen, Fotoapparate, Ozeandampfer, Luftschiffe, Automobile, Stromleitungen und Glühlampen gesehen hatte, eröffnete die Röntgenstrahlung plötzlich einen völlig neuen Blick in das Innere der Materie. Dafür erhielt Röntgen den ersten Nobelpreis für Physik im Jahr 1901.

Es ist vielleicht kein Zufall, dass seine Entdeckung am Anfang einer kulturellen und wissenschaftlichen Revolution stand. Zur damaligen Zeit gab es sowohl in der Kunst als



# JAHRGANGS CD-ROM 2019

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. 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/sammeln**



In einer Kathodenstrahlröhre werden Elektronen beschleunigt, wodurch Strahlung entsteht.

SCIENCE MUSEUM LONDON: X-RAY TUBE, ENGLAND, 1896-1900 (WELLCOME COLLECTION.ORG/WORPS/4QHSZ8) / CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS.ORG/LICENSING/4.0/LEGALCODE)

auch in der Wissenschaft einen Wandel, bei dem man die bis dahin geltenden Gesetze hinter sich ließ und völlig Neues hervorbrachte. In der Physik entstand die Relativitätstheorie, die mit den bisherigen Vorstellungen von Raum und Zeit brach, sowie die Quantenmechanik, welche das naturwissenschaftliche Verständnis von Materie und Kausalität umwälzte. Zeitgleich entwickelten Künstler um die Jahrhundertwende zahlreiche moderne Stile wie den Expressionismus, die mit vorherrschenden Gewohnheiten brachen. Vielleicht hat auch der neue »Röntgenblick« den ein oder anderen Wissenschaftler oder Künstler inspiriert, ganz neue Sichtweisen und Ausdrucksformen zu suchen?

Der Ruhm und der öffentliche Rummel um seine Person wurden Röntgen aber schnell zu viel. Zudem verschlechterte sich die Gesundheit seiner schon lange kränkelnden Frau zunehmend, so dass er sich immer mehr aus der Öffentlichkeit zurückzog, um sich um sie zu kümmern. Nie wieder gab er einen großen öffentlichen Vortrag – nicht einmal zur Vergabe seines Nobelpreises, obwohl das laut Statuten vorgesehen ist. Über die nach ihm benannten Strahlen verfasste er nur noch zwei weitere Aufsätze und wandte sich stattdessen anderen Dingen zu. Röntgen schrieb seinem Freund und Schweizer Kollegen Ludwig Zehnder: »Mir war nach einigen Tagen die Sache vereckelt; ich kannte aus den Berichten meine eigene Arbeit nicht wieder.«

### Hype um die unsichtbaren Strahlen

Doch der Rest der Welt war geradezu verrückt nach den neuen Strahlen. Der neuseeländische Experimentalphysiker Ernest Rutherford schilderte seine Erinnerungen an diese Zeit: »Jedes Labor auf der Welt holte damals seine alten Vakuumröhren hervor, um Röntgenstrahlen zu produzieren.« Zum Beispiel entdeckte Henri Becquerel die radioaktive Strahlung, und Joseph Thomson konnte erstmals ein Elektron experimentell nachweisen.

Röntgen beobachtete diese Entwicklungen allerdings lieber aus der Ferne. Allgemein galt er als introvertierter und großzügiger Mensch, der sich wohlfühlte, wenn er in Ruhe forschen und sich im kleinen Kreis mit vertrauten Menschen austauschen konnte. Er verzichtete darauf, Patente auf seine Arbeiten anzumelden. Seiner Ansicht nach sollte eine so wichtige Sache dem Wohl der Mensch-

heit dienen und nicht den Reichtum eines Einzelnen mehren. Auch das Preisgeld, das ihm der Nobelpreis einbrachte, spendete er seiner Universität.

In den 1920er Jahren war Röntgen jedoch praktisch pleite. Die Hyperinflation nach dem Ersten Weltkrieg hatte auch den weltberühmten Wissenschaftler ruiniert. Dank seiner Beamtenstellung erhielt er allerdings ausreichende Pensionszahlungen, von denen er seinen Lebensunterhalt bestreiten konnte. 1923 starb Röntgen an Darmkrebs. Es ist unwahrscheinlich, dass die Erkrankung mit seiner wissenschaftlichen Arbeit zusammenhängt, denn im Gegensatz zu anderen Forschern seiner Zeit experimentierte er vergleichsweise vorsichtig mit der nach ihm benannten Strahlung und schirmte sie etwa mit Bleiplatten ab. Außerdem arbeitete er mit nicht allzu energiereichen Strahlen – und selbst das nur über einen begrenzten Zeitraum.

Vielen anderen erging es schlechter. In den frühen Jahren des »Röntgen-Rummels« wusste man noch nicht, dass ionisierende Strahlung unter anderem Krebs, genetische Mutationen oder (bei besonders hohen Dosen) auch Verbrennungen und Augenschäden hervorrufen kann. Hunderte von Technikern und Patienten, die in den Anfangsjahren mit der Röntgenstrahlung zu tun hatten, erkrankten an Krebs.

Selbst als bekannt war, dass man mit Röntgenstrahlen vorsichtig umgehen sollte, nahmen viele die Sicherheitshinweise nicht ernst. So konnte man noch bis in die 1970er Jahre in einigen Läden mit Röntgenlicht überprüfen, ob Schuhe richtig passen. Solche Geräte hatten dabei teilweise die 1000-fache Dosis von modernen Röntgenapparaten.

Wilhelm Conrad Röntgen erhielt nicht nur zahlreiche Auszeichnungen; nach ihm sind zudem etliche Preise, ein Asteroid sowie das Element 111 (Röntgenium) benannt. Bescheiden blieb er bis zum Schluss: In seinem Testament verfügte der Forscher, dass seine gesamte persönliche und wissenschaftliche Korrespondenz vernichtet werden sollte – was auch geschah. ◀

### QUELLEN

**Röntgen, W.C.:** On a new kind of rays. *Science* 3, 1896

**Rosenbusch, G., de Knecht-van Eekelen, A.:** Wilhelm Conrad Röntgen. Springer Biographies, 2019



FRANZISCHÄDEL, FLORIAN-FREISTETTER.DE/PRESSE//  
CC BY-SA 4.0 / CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/SYNDICATE/LEGALCODE

# FREISTETTERS FORMELWELT REISE ZU DEN STERNEN

Wie lange bräuchten wir, um zu einem anderen Stern zu fliegen? Lange! Aber es könnte schneller gehen, wenn wir uns Zeit lassen.

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

» [spektrum.de/artikel/1714808](https://spektrum.de/artikel/1714808)

Die Suche nach einer »zweiten Erde« ist eine der großen Aufgaben der Astronomie. Irgendwo dort draußen gibt es vermutlich Planeten, auf denen ähnlich lebensfreundliche Bedingungen herrschen wie bei uns. Entdeckt wurde so ein Himmelskörper bislang noch nicht, aber mit den immer besser werdenden Teleskopen ist das eigentlich nur eine Frage der Zeit. Ob wir diese Welt jedoch auch besuchen können, ist zweifelhaft.

Sieht man von Sciencefiction-Lösungen wie überlichtschnellen Antrieben oder Wurmlöchern ab, dann braucht die interstellare Raumfahrt vor allem eines: Zeit. Es ist einfach zu viel Platz zwischen den Sternen und Galaxien. Wenn man die gigantischen Leerräume im All dennoch durchqueren will, sollte man es ruhig angehen lassen. Das besagt diese mathematische Formel:

$$\frac{t_0}{T} = 2 \frac{t}{h}$$

Sie stammt aus der Arbeit »Interstellar Travel – The Wait Calculation and the Incentive Trap of Progress«, die Andrew Kennedy 2006 im »Journal of the British Interplanetary Society« veröffentlicht hat. Angenommen, so Kennedy, wir wollten zu Barnards Stern reisen, der sechs Lichtjahre entfernt liegt. Mit einer Geschwindigkeit von etwa 150 Kilometer pro Sekunde (mehr als eine halbe Million Kilometer pro Stunde) würden wir dafür 12 000 Jahre brauchen. Sollte ein Generationenschiff von der Erde aus aufbrechen, wird in der Zwischenzeit vermutlich viel passieren. Höchstwahrscheinlich entstehen neue und bessere Antriebe, welche die Reise deutlich schneller schaffen. Nach ihrer Ankunft bei Barnards Stern könnte die Langzeitreisegruppe feststellen, dass schnellere Raumschiffe von der Erde schon längst vor Ort eingetroffen sind.

Besser wäre es gewesen, sie hätten noch ein wenig gewartet. Aber wie lange? Das beschreibt Kennedys Formel. » $t_0$ « bezeichnet die gegenwärtig erreichbare Reisezeit, » $h$ « entspricht der Dauer, bis sich die Reisegeschwindigkeit verdoppelt, und » $t$ « ist die Zeit, die man bis zum tatsächlichen Abflug verstreichen lässt. » $T$ « gibt dann an, wie lange man nach Ablauf der Wartezeit  $t$  braucht, um einen fernen Stern zu erreichen.

Geht man von den bereits erwähnten 12 000 Jahren als Richtwert für die Gegenwart aus und von einer Geschwindigkeitsverdopplung alle 100 Jahre, dann könnte man nach einer Wartezeit von 637 Jahren in nur 145 Jahren zu Barnards Stern fliegen. Würde man länger warten, wäre man zwar schneller dort, dieser Vorteil wird jedoch durch die längere Wartezeit wettgemacht. Für die oben genannte Gleichung ist  $637 + 145 = 782$  Jahre tatsächlich das Minimum: Man kann nicht in kürzerer Zeit zu Barnards Stern gelangen.

Eine Geschwindigkeit von 150 Kilometer pro Sekunde ist angesichts der derzeit verfügbaren Technik allerdings zu hoch angesetzt. In Wirklichkeit erreicht man höchstens ein Zehntel des Werts – und das auch nur mit kleinen Raumsonden, in denen ein Mensch weder Platz hat noch für lange Zeit überleben könnte.

Außerdem ist fraglich, ob die Technologie tatsächlich konstant fortschreitet und sich die Reisegeschwindigkeit alle 100 Jahre verdoppelt. Der Prozess könnte deutlich langsamer ablaufen – oder schneller. All diese Faktoren (inklusive weiterer Komplikationen wie relativistische Effekte bei extrem hohen Geschwindigkeiten) berücksichtigt Andrew Kennedy in den nachfolgenden Kapiteln seiner Arbeit. Das Grundproblem bleibt dabei aber bestehen: Wir werden ferne Exoplaneten so schnell leider nicht erreichen. Denn man muss dafür entweder sehr lange durchs All fliegen oder abwarten und hoffen, dass jemand einen leistungsfähigen Antrieb entwickelt.

# MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN WIE EINE EPIDEMIE VERLÄUFT

**Wann erreicht eine Epidemie wie der gegenwärtige Ausbruch der Viruserkrankung Covid-19 ihren Höhepunkt? Welchen Effekt haben Einschränkungen des öffentlichen Lebens auf den Verlauf? Und womit haben wir nach dem Abklingen einer Pandemie zu rechnen? Mathematische Modellbildung liefert zumindest gewisse Teilantworten.**

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und war bis 2018 Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

► [spektrum.de/artikel/1714798](https://spektrum.de/artikel/1714798)

Ein Mensch aus dem Kreis Heinsberg im Rheinland besucht eine lokale Karnevalsveranstaltung. Alles spricht dafür, dass er infiziert ist, dort weitere Menschen ansteckt und so das Virus verbreitet. Damit ist dieses Einzelereignis die Ursache dafür, dass auf der Deutschlandkarte der Infizierten ausgerechnet dieser Landkreis im äußersten Westen als besonders betroffen hervorsticht (siehe Bild, rechts).

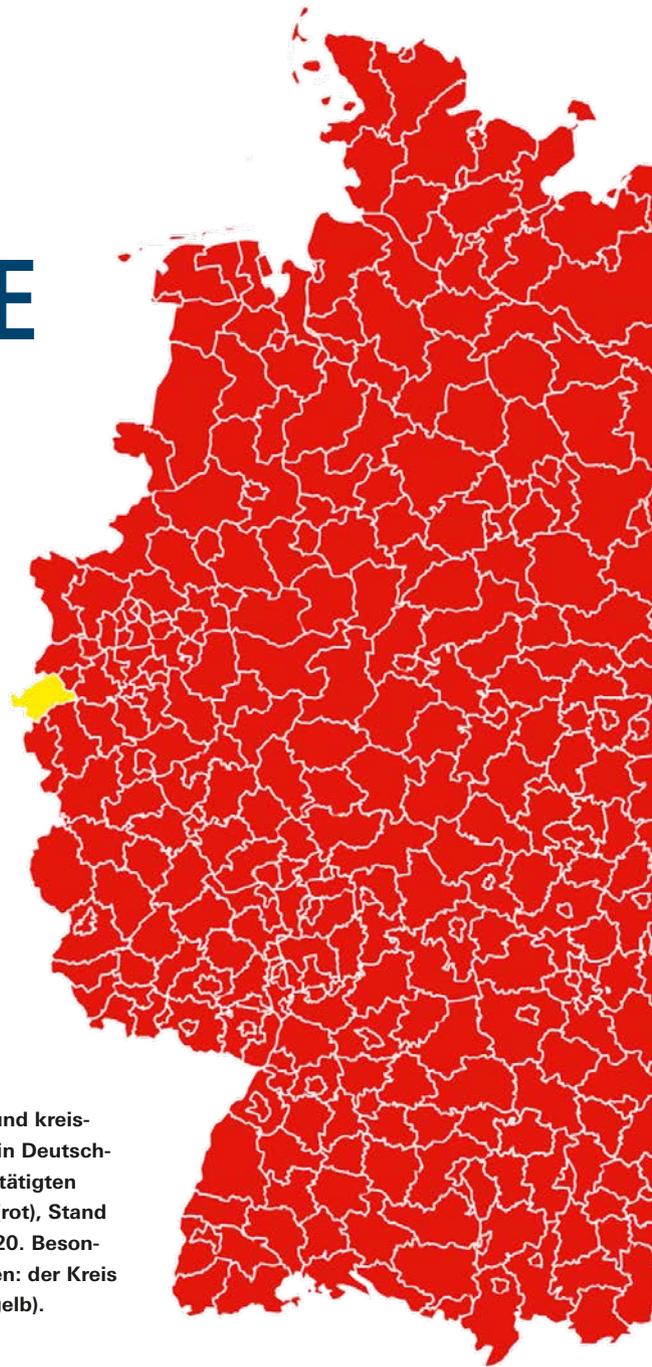
Was sagt die Mathematik zu dieser Geschichte? So gut wie nichts. Dass es ausgerechnet den Landkreis Heinsberg getroffen hat, kann sie allenfalls als Zufall verbuchen und hinzufügen, dass eine große Menge Menschen, die noch nie mit dem Virus Sars-CoV-2 konfrontiert wurde, einen äußerst instabilen Systemzustand darstellt. Daraus folgt, dass dieser Zustand zusammenbrechen wird; aber wo der erste Dominostein fällt, darüber gibt es keine Aussage.

Mathematik kommt erst ins Spiel, wo viele Zufallsergebnisse zusammenkommen und sich dadurch nach dem Gesetz der großen Zahlen ein regelhaftes Gesamtbild ergibt. So fügt sich die Anzahl der Infizierten in Deutschland, über der Zeit aufgetragen, zu einer glatten, allerdings erschreckend schnell ansteigenden Kurve. Die Zahlen verdoppeln sich ungefähr alle drei Tage (Stand bis zur Drucklegung am 25. 3. 2020).

**Landkreise und kreisfreie Städte in Deutschland mit bestätigten Infektionen (rot), Stand 25. März 2020. Besonders betroffen: der Kreis Heinsberg (gelb).**

Da kommt einem Mathematiker unweigerlich die Exponentialfunktion in den Sinn. Man schreibt sie als  $e^x$ , und sie ist das Mittel der Wahl, um Prozesse ungebremsten Wachstums darzustellen, zum Beispiel einer Bakterienkolonie, die über unbegrenzte Nahrungsvorräte verfügt, oder, mit negativem Vorzeichen, destruktive Prozesse wie den radioaktiven Zerfall. Ihre wesentliche mathematische Eigenschaft besteht darin, dass sie gleich ihrer eigenen Ableitung ist: Für  $f(x) = e^x$  gilt  $f'(x) = e^x$ .

Die Funktion, um die es hier geht, nämlich die Anzahl der Infizierten, hängt von der Zeit ab; daher schreiben wir jetzt die unabhängige Variable als  $t$ . Und damit so etwas wie eine Exponentialfunktion herauskommt, genügt es, über das Verhalten des Gesamtsystems eine einfache und plausible Annahme zu machen: Die Rate  $y'$  der Neuinfizier-





ten, gemessen in Menschen pro Zeiteinheit, ist proportional der Anzahl  $y$  der Infizierten selbst. Je mehr Träger des Erregers frei herumlaufen, desto mehr bislang Gesunde stecken sich an. In Formeln ausgedrückt:  $y'(t) = k \cdot y(t)$  mit einem Proportionalitätsfaktor  $k$ , über den wir später noch nachdenken müssen.

Das ist eine Differenzialgleichung, das heißt, die Unbekannte ist eine Funktion, und die Gleichung setzt die unbekannte Funktion mit ihrer Ableitung in Beziehung. In der unübersichtlichen Schar der Differenzialgleichungen ist unsere eines der einfachsten Exemplare: Sie ist linear, das heißt, die Summe zweier Lösungen oder auch eine Lösung mal einer Konstanten ist wieder eine Lösung.

Und für diese Klasse von Gleichungen – lineare gewöhnliche Differenzialgleichungen mit konstanten Koeffizienten – hat man ein sonst sehr seltenes Vergnügen: Man kann die Lösungen explizit formelmäßig hinschreiben. Jede Lösung der Gleichung  $y'(t) = k \cdot y(t)$  hat die Form  $y(t) = y_0 e^{kt}$ .

Die Zahlen  $y_0$  und  $k$  kennen wir noch nicht, aber wir können sie interpretieren.  $k$  ist so etwas wie die Infektiosität, also ein Maß für die Leichtigkeit, mit der das Virus von einem Menschen auf einen anderen überspringt; und  $y_0$  ist die Anzahl der Infizierten zum (willkürlich gewählten) Zeitpunkt  $t = 0$ . Und wie finden wir die Werte für diese Zahlen? Wir ermitteln sie aus den vorliegenden Daten. Und zwar suchen wir unter allen Funktionen der Form  $y(t) = y_0 e^{kt}$  diejenige, die am besten zu den Daten passt.

Daraus ergeben sich konkrete Werte für  $y_0$  und  $k$  (siehe Bild, S. 80).

Es wirkt zunächst so, als hätten wir damit die Epidemie erfolgreich mathematisch modelliert; die Kurve passt ja wirklich überzeugend zu den Punkten. Vor allem könnten wir nun unsere Exponentialfunktion mit den nunmehr bekannten Parametern  $y_0$  und  $k$  für zukünftige Zeiten ausrechnen und damit eine Prognose für den Verlauf der Epidemie gewinnen.

Weit gefehlt! Entgegen populären Vorstellungen kann man sich nicht darauf verlassen, dass man das richtige Modell gefunden hat, wenn es einem gelungen ist, eine schöne Kurve durch die Datenpunkte zu legen. Das sieht man auch an diesem Beispiel. In der Differenzialgleichung stecken ein paar Annahmen, die offensichtlich falsch sind, was aber die Kurve nicht gehindert hat, sich den Daten anzupassen.

Dabei ist die Annahme, bei den empirisch erhobenen Daten handle es sich um die Gesamtzahl der Infizierten, noch ein relativ harmloser Fehler: Man muss mit einer hohen Dunkelziffer rechnen. Wenn es in Wirklichkeit zehnmal so viele Infizierte wie positiv Getestete gibt, stecken sich jeden Tag zehnmal so viele Leute an, wie das Modell behauptet. Nur wird von diesen ebenso nur jeder Zehnte

später registriert, wodurch das Modell wieder konsistente Zahlen liefert. Es zeigt eben nicht die Zahl der Infizierten, sondern die Zahl der registrierten Infizierten; aber dank der Linearität der Differenzialgleichung ist die Erstere ein konstantes Vielfaches der Letzteren, so dass das Modell den Verlauf bis auf einen Faktor, der die Dunkelziffer beschreibt, korrekt wiedergibt – solange sich an den Kriterien dafür, wer getestet wird, nichts Wesentliches ändert.

Im Gegensatz zu einer Ansteckung bleibt ein Todesfall in der Regel nicht unbemerkt. Auf die Frage, welcher Anteil der Infizierten stirbt, gibt die Zahl der Registrierten ebenso wie das daraus hergeleitete Modell eben wegen der Dunkelziffer nur unzureichend Auskunft. Tröstlich ist immerhin: Die echte Todesrate liegt regelmäßig unter der empirischen (Anzahl der Toten geteilt durch Anzahl der Registrierten). Je unzureichender getestet wird, desto mehr wird die Todesrate überschätzt.

### Ein Vorbild an der Chemie nehmen

Kritischer ist die Tatsache, dass das Modell eine Inkubationszeit von null unterstellt. Die Leute, die sich heute anstecken, gelten bereits ab heute als Verbreiter der Krankheit. Eigentlich müsste die Gleichung  $y'(t) = k \cdot y(t - 5)$  lauten, wenn man annimmt, dass es fünf Tage dauert, bis ein Infizierter selbst ansteckend wird. Setzen wir als Lösung versuchsweise wieder unsere allgemeine Exponentialfunktion ein, diesmal aber vorsichtshalber mit neuen Parametern:  $y(t) = y_1 e^{ct}$ , dann ist  $y'(t) = c \cdot y_1 e^{ct}$ , andererseits ist  $k \cdot y(t - 5) = k \cdot y_1 e^{c(t-5)} = k \cdot y_1 e^{-5c} e^{ct}$ . Die Gleichung  $y'(t) = k \cdot y(t - 5)$  ist also erfüllt, wenn für die Zahlen  $c$  und  $k$  die Gleichung  $c = k \cdot e^{-5c}$  gilt.

Daraus folgt: Selbst wenn man eine Inkubationszeit ansetzt – hier zum Beispiel fünf Tage –, ist die Lösung des Modells wieder eine Exponentialfunktion. Wenn umgekehrt eine solche Funktion zu den Daten passt, sagt das nichts über die Dauer der Inkubationszeit. Nur den Wert von  $c$  gewinnt man durch den Abgleich mit den Daten; der ist nun aber nicht unmittelbar ein Maß für die Infektiosität. Vielmehr kann man  $k$  aus  $c$  berechnen, wenn man die Inkubationszeit aus anderer Quelle kennt.

Der größte Fehler unseres Einfachmodells tritt zu Tage, wenn man es für eine Prognose nutzt. Bereits nach gut zwei Monaten überschreitet die Anzahl der Infizierten die Einwohnerzahl Deutschlands! Kein Wunder: Die Exponentialfunktion strebt rasch gegen unendlich. Wir haben bisher nicht berücksichtigt, dass das Virus, um sich weiterzuverbreiten, Menschen finden muss, die noch nicht befallen sind; und die werden mit zunehmender Durchseuchung immer knapper. Korrekterweise muss man die Gleichung so formulieren, wie es die Chemiker mit dem so genannten Massenwirkungsgesetz tun: Die Reaktionsrate ist proportional dem Produkt der Konzentrationen der beteiligten Reaktanden. Übertragen auf das Epidemieszenario heißt das: Die Entstehung neu Infizierter ist gleich einer Konstante mal der Anzahl der Ansteckenden mal der Anzahl der noch Gesunden:  $y'(t) = k \cdot y(t) \cdot (G - y(t))$ , wobei  $G$  die Gesamteinwohnerzahl ist.

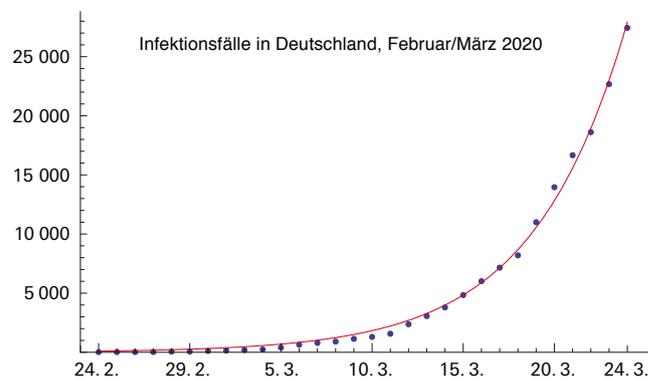
Diese Gleichung – man nennt sie eine Bernoulli-Differenzialgleichung – ist nun nicht mehr linear. Entsprechend muss man etwas tiefer in die Trickkiste greifen, um eine Lösung zu finden. Immerhin ist sie in Form einer expliziten Formel verfügbar. Silvio Martin, ein in der Industrie tätiger Mathematiker aus Oberhausen im Ruhrgebiet, hat das mit den am 12. März verfügbaren Daten durchgerechnet und kommt zu dem Ergebnis, dass der größte Zuwachs an Infizierten für Mitte bis Ende April zu erwarten ist und 20 Tage später 70 von den 83 Millionen Einwohnern Deutschlands in Kontakt mit dem Virus geraten sind, was einer kompletten Durchseuchung nahekommmt. Dass die gemeldeten Zahlen nur einen Bruchteil der tatsächlich Infizierten erfassen, ändert an dieser Prognose nicht viel: Die Katastrophe – es erkrankten mehr Menschen, als das Gesundheitssystem bewältigen kann – verläuft genau so, nur ein paar Tage

früher. Berücksichtigt man die Inkubationszeit, so erhöht sich der Wert von  $k$ , und die s-förmige Kurve wird steiler.

In einem weiteren Punkt ist unser bisheriges Modell viel zu pessimistisch: Es sieht nicht vor, dass jemand je wieder gesund wird. Für den Verlauf der Epidemie ist das allerdings ein schwacher Trost. Die Kurve flacht nur geringfügig ab, wenn man annimmt, dass ein Infizierter nach 10, 14 oder 20 Tagen nicht mehr ansteckend ist – wobei es zynischerweise nicht auf den Grund ankommt: Dem Modell ist es einerlei, ob der Mensch genesen, in Quarantäne oder tot ist.

Was kann man gegen die Epidemie tun? Allgemein hat sich die Auffassung durchgesetzt, dass die Krankheit nicht mehr einzufangen ist, indem man ihre Träger ausfindig macht und aus dem Verkehr zieht – was bei der Sars-Pandemie von 2002/2003 mit deren wesentlich gefährlicherem Erreger noch gelungen war. Vielmehr zielen die gegenwärtigen einschneidenden Maßnahmen sämtlich darauf ab, die Übertragungsrate  $k$  zu verringern. Die Chemiker gehen in ihren Modellen von dem perfekt gerührten Reaktionsgefäß aus (continually stirred tank reactor, CSTR): Die Konzentration der Reaktanden und damit der Systemzustand ist überall im Kessel gleich. In diesem Bild gesprochen versuchen die Behörden, den großen Rührlöffel anzuhalten, der unter normalen Umständen unsere Gesellschaft durchmischt.

Solche Maßnahmen können in der Tat die S-Kurve erheblich abflachen und damit die Anzahl der Menschen, die gleichzeitig ins Krankenhaus müssen, auf ein handhabbares Maß drücken – nicht aber die Anzahl derjenigen, die überhaupt erkranken. Die Epidemie wird nur zeitlich in die Länge gezogen. Sollte es gelingen, die Zahl der Kontakte



CHRISTOPH RÖPPE

Die blauen Punkte zeigen die kumulierten bestätigten Infektionsfälle nach Daten des Robert Koch-Instituts. Die rote Kurve ist die Exponentialfunktion  $y(t) = y_0 e^{kt}$ , die am besten zu diesen Daten passt. Die Zeit  $t$  wird in Tagen gemessen, Tag 0 ist der 23. Februar. Es ergeben sich die Parameter  $y_0 = 80,96$  in der Einheit Menschen und  $k = 0,195$  in der Einheit 1/Tag.

auf ein Fünftel des bisherigen Werts zu vermindern, würde die heiße Phase – inklusive durchgehendem Ausnahmezustand – nach Silvio Martins Berechnungen reichlich ein Dreivierteljahr dauern (siehe Bild, rechts).

Die niederländische Gesundheits- und Umweltbehörde RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu) denkt bereits darüber nach, Schulen und Gaststätten nach relativ kurzer Zeit wieder zu öffnen, damit die Epidemie nicht zu langsam verläuft. Vielleicht hat sie das schon getan, wenn dieses Heft im Druck erscheint.

### Soziale Isolation als einziger Ausweg?

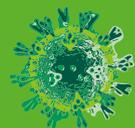
Welchen Effekt die Stilllegung des öffentlichen Lebens auf die Ansteckungsrate  $k$  hat, ist kaum seriös einzuschätzen. Wenn Sie diese Zeilen lesen, wissen Sie mehr als ich, während ich sie schreibe; denn ein erstes Abflachen der Kurve kann wegen der Verzögerung durch die Inkubationszeit und die Datenerfassung erst nach der Drucklegung eintreten. Immerhin gibt es aus den Ländern, die uns mit der Epidemie zeitlich voraus sind, erste Einschätzungen.

Eine chinesisch-britische Kooperation unter Leitung von Shengjie Lai und Nick W. Ruktanonchai konnte Bewegungsdaten der Chinesen, die dort massenhaft über die Nutzung der Smartphones gesammelt werden, im kritischen Zeitraum um das chinesische Neujahrsfest auswerten, das dieses Jahr auf den 25. Januar fiel. Just zwei Tage zuvor waren der Hauptausbruchsort Wuhan und umliegende Städte mit einer Sperre belegt worden. Ein großer Teil der Reisen, welche die Chinesen aus Anlass des Neujahrsfests unternahmen, hatte zu diesem Zeitpunkt allerdings schon stattgefunden. Zum Vergleich verfügten die Forscher über Daten aus dem Zeitraum 26. Dezember 2014 bis 26. Mai 2015; damals war das Neujahrsfest am 19. Februar. Mit Hilfe eines klassischen mathematischen Modells ermittelten sie, wie die Epidemie verlaufen wäre, wenn die Chinesen sich 2020 so ungestört hätten bewegen können wie fünf Jahre zuvor. Es ergeben sich drastische Zahlen:

Mehr Wissen auf [Spektrum.de](http://Spektrum.de)

Alle aktuellen Artikel zur Covid-19-Pandemie finden Sie auf unserer Schwerpunktseite

[spektrum.de/t/coronaviren](http://spektrum.de/t/coronaviren)



**Covid-19-  
PANDEMIE**

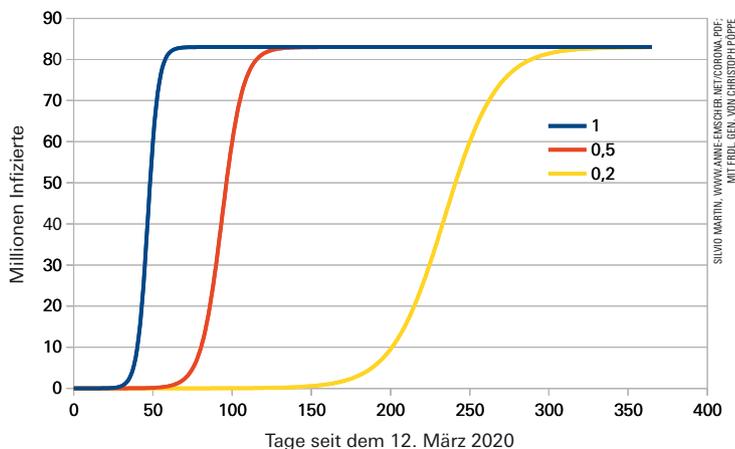
KORO. FEAM. GETTY IMAGES/ISTOCK  
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ohne die Intervention wären 67-mal so viele Menschen erkrankt. Hätte man die Sperre dagegen eine, zwei oder drei Wochen früher verhängt, dann wäre die Zahl der Infizierten um 66, 86 beziehungsweise 95 Prozent geringer ausgefallen.

Für Italien, das unter den Ländern Europas mit Abstand am stärksten betroffen ist, sind die Zahlen wegen des späteren Ausbruchs noch vorläufiger und deutlich weniger eindrucksvoll. Eine Gruppe um Emanuele Pepe von der Stiftung ISI (Institute for Scientific Interchange) in Turin hat dazu die GPS-Daten der Smartphones von etwa 170 000 Nutzern mit deren Zustimmung ausgewertet und anonymisiert. Erwartungsgemäß nahmen auf Grund der Restriktionen sowohl die zurückgelegten Entfernungen als auch die persönlichen Begegnungen ab. Dabei unterstellten die Forscher einen Kontakt zwischen zwei Menschen, wenn deren Smartphones sich mindestens eine Stunde lang in einer Entfernung von weniger als 50 Metern befanden. Die Anzahl der so definierten Kontakte sank in der Woche der Totalsperre ab dem 7. März um 30 Prozent – gemessen an der Härte der Maßnahmen ein eher bescheiden anmutender Wert. Aber die reine Auszählung unterschätzt die Wirksamkeit; denn unter den Kontakten sind wahrscheinlich die meisten solche innerhalb der Familie oder Kleingruppe, die schon vorher bestanden und die zu unterdrücken daher sinnlos gewesen wäre. Man darf also davon ausgehen, dass die Kontakte mit bisher Unbekannten wesentlich stärker zurückgegangen sind als um 30 Prozent. Aber das lässt sich wegen der Anonymität nicht verifizieren.

Beide Arbeiten, die chinesische wie die italienische, haben den Begutachtungsprozess (peer review) noch nicht durchlaufen. Daher muss offen bleiben, ob die auffälligen Diskrepanzen auf Unterschiede in der Erfassung, Verarbeitung und Interpretation der Daten zurückzuführen sind – oder tatsächlich darauf, dass die italienischen Maßnahmen, so hart sie im europäischen Vergleich anmuten, so viel milder sind als die chinesischen.

Während der Höhepunkt der Pandemie noch bevorsteht, denken einige Wissenschaftler bereits über die Zeit danach nach. Eine Autorengruppe um Stephen M. Kissler von der Harvard T. H. Chan School of Public Health in Boston befasst sich zu diesem Zweck mit der Verwandtschaft des Erregers. Das Virus Sars-CoV-2 gehört zur Gattung der Beta-Coronaviren; diese umfasst sowohl die hochgefährlichen Verursacher der Sars- und der Mers-Epidemie als auch die vergleichsweise harmlosen HCoV-OC43 and HCoV-HKU1, die als die zweithäufigsten Erreger der gewöhnlichen Erkältung gelten. Nach den bisher vorliegenden Erkenntnissen folgt die Verbreitung des neuen Virus ungefähr dem Muster seiner harmlosen Verwandten, allerdings ohne vom feuchtkalten Wetter besonders begünstigt zu werden. Indem die Forscher die – ebenfalls nur fragmentarisch vorliegenden – Daten zu den Erkältungsviren einer mathematischen Simulation zu Grunde legen, kommen sie zu einigen vorsichtigen Schlüssen: Ist das aktuelle Virus erst einmal vollständig um die Welt gewan-



**Nach dem Modell von Silvio Martin steigt die Zahl der Infizierten steil an, wenn die Infektionsrate  $k$  den Wert beibehält, der aus den Zahlen der ersten Tage ermittelt wurde (blau). Sinkt  $k$  auf die Hälfte (rot) oder ein Fünftel (gelb) dieses Wertes, verläuft der Anstieg milder, zieht sich aber über längere Zeit hin.**

dert, wird es wohl wiederkehren, allerdings nicht im Jahresrhythmus, weil es dazu keinen Anlass hat.

Sofern eine erworbene Immunität wie bei den harmlosen Verwandten nur eine relativ begrenzte Haltbarkeit hat, wird deren durchschnittliche Dauer den Zeitabstand bis zum nächsten Ausbruch bestimmen. Sollte die Immunität dagegen dauerhaft sein, kann dieses Zeitintervall fünf Jahre oder mehr betragen – so lange, bis eine kritische Masse an Menschen herangewachsen ist, die noch nie mit dem Virus Kontakt hatten. Und es besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass sich Kreuzimmunitäten etablieren, dass also Antikörper, die man sich beim Kontakt mit der einen Krankheit zugelegt hat, gegen die andere eine gewisse Wirkung haben. ◀

#### QUELLEN

**Kissler, S. M. et al.:** Projecting the transmission dynamics of SARS-CoV-2 through the post-pandemic period. MedRxiv 10.1101/2020.03.04.20031112, 6. 3. 2020

**Lai, S. et al.:** Effect of non-pharmaceutical interventions for containing the COVID-19 outbreak in China. MedRxiv 10.1101/2020.03.03.20029843, 13. 3. 2020

**Martin, S.:** Ausbreitung von Corona (COVID-19) in Deutschland. <http://www.anne-emscher.net/corona.pdf>, 12. 3. 2020

**Pepe, E. et al.:** COVID-19 outbreak response: first assessment of mobility changes in Italy following lockdown. <https://covid19mm.github.io/in-progress/2020/03/13/first-report-assessment.html>

#### WEBLINK

**Stevens, H.:** Why outbreaks like coronavirus spread exponentially, and how to »flatten« the curve. Washington Post, 14. 3. 2020. [www.washingtonpost.com/graphics/2020/health/corona-simulator-german/?hpid=hp\\_hp-top-table-main-coronavirus-simulator-german%3Ahomepage%2Ftrending%3Ahomepage%2Ftrending&hpid=hp\\_hp-top-table-main-coronavirus-simulator-german%3Ahomepage%2Ftrending%3Ahomepage%2Ftrending](http://www.washingtonpost.com/graphics/2020/health/corona-simulator-german/?hpid=hp_hp-top-table-main-coronavirus-simulator-german%3Ahomepage%2Ftrending%3Ahomepage%2Ftrending&hpid=hp_hp-top-table-main-coronavirus-simulator-german%3Ahomepage%2Ftrending%3Ahomepage%2Ftrending)

*Grafisch ansprechende Simulationen für die Ausbreitung von Epidemien unter diversen Bedingungen*



MAAYAN HAREL (MAYANILLUSTRATION.COM)

# DENISOVANE ALLES BEGANN MIT EINEM FINGERKNÖCHELCHEN

Allein durch die Analyse uralter DNA haben Paläogenetiker vor zehn Jahren eine ausgestorbene Menschenform entdeckt: den Denisovaner. Wie dieser einst aussah, war jedoch auf Grund der spärlichen Fossilienreste völlig unklar. Inzwischen haben Forscher mehrere Fährten aufgenommen, die sie bis aufs Dach der Welt und in unser Erbgut führen.

Jean-Jacques Hublin leitet die Abteilung Humanevolution am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig. Er ist außerdem seit 2006 Honorarprofessor für Anthropologie an der Universität Leipzig und seit 2014 Gastprofessor am Collège de France in Paris.



MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

► [spektrum.de/artikel/1714800](https://spektrum.de/artikel/1714800)



BENNETT, E.A. ET AL.: MORPHOLOGY OF THE DENISOVAN PHALANX CLOSEST TO MODERN HUMANS THAN TO NEANDERTHALS. SCIENCE ADVANCES 9, EAW9550, 2019. FIG. 3A ([DOI: 10.1126/sciadv.aw9550](https://doi.org/10.1126/sciadv.aw9550)); GEZEHNIGT VON SCIENCE / ANAS

Aus einem winzigen Stück dieses Fingerglieds (blau und grün gefärbt) haben Paläogenetiker 2010 das Erbgut eines Denisova-Mädchens entziffert. Vor Kurzem konnten Forscher das 52000 bis 76000 Jahre alte Fossil mit einem weiteren Fragment aus der Denisova-Höhle ergänzen. Aus der extrahierten Erbinformation des Fingerknöchelchens haben Bioinformatiker 2019 die anatomischen Merkmale des Mädchens rekonstruiert. Auf den Ergebnissen beruht das Bildnis links.

► Immer wenn die Bekanntgabe einer bedeutenden Entdeckung bevorsteht, macht sich das in der Cafeteria des Leipziger Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie als Erstes bemerkbar. Die Luft schwirrt dann dort regelrecht vor Gerüchten. Solche Momente gab es in der Vergangenheit häufiger. Denn seit der Gründung des Instituts 1997 jagte eine Entdeckung die nächste. Besonders hat sich aber das Jahr 2010 ins kollektive Gedächtnis der Leipziger Forscher gebrannt – da herrschte in der Cafeteria außergewöhnlich viel Aufregung. In jenem Jahr hatten meine Kollegen nicht nur das Erbgut des Neandertalers entziffert, sondern auch eine bisher unbekannte, ausgestorbene Menschenform entdeckt – und das auf eine nie da gewesene Art und Weise: nur durch die Sequenzierung von DNA aus einem winzigen fossilen Knochenstück.

Schon seit vielen Jahren hat die Paläogenetik im Leipziger Max-Planck-Institut einen gewaltigen Aufschwung erlebt. Die treibende Kraft dahinter war mein Kollege Svante Pääbo. Zusammen mit seinem Team entzifferte er 2006 ein kurzes Stück aus der Erbsubstanz des Neandertalers – dessen mitochondriale DNA (mtDNA). Sie stammt aus den Mitochondrien, kleinen Organellen, welche die Zelle mit Energie versorgen. Der überwiegende Teil des Erbguts liegt dagegen in Chromosomen verpackt im Zellkern. Für Paläogenetiker ist die mtDNA der leichtere Fang: Von ihr ist stets



KARTE: PETERHESSELBRIAN / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

**Fundorte von Denisovaner-Fossilien: Wo genau Neandertaler, Denisovaner und anatomisch moderne Menschen in Asien lebten, ist noch nicht endgültig geklärt.**

sehr viel mehr in einem Fossil erhalten als von der Zellkern-DNA. Allerdings verrät sie auch nur zum Teil die genetische Identität eines Individuums, weil sie ausschließlich von der Mutter auf die Nachkommen vererbt wird. Doch einer Arbeitsgruppe um Richard Green, David Reich und Svante Pääbo gelang es schließlich, auch die Kern-DNA des *Homo neanderthalensis* zu sequenzieren. Im Mai 2010 veröffentlichten sie ihre Ergebnisse in einem bahnbrechenden Artikel in der Fachzeitschrift »Science«.

DNA aus jahrzehntausendealten Fossilien zu extrahieren, war lange Zeit undenkbar. Schlicht deshalb, weil das Trägermaterial unserer Gene nicht besonders stabil ist. Stirbt ein Organismus, zerfallen die DNA-Ketten in viele kleine Bruchstücke, die sich sehr rasch mit Milliarden weiterer DNA-Fragmente aus jenen Bakterien und Pilzen vermischen, die den Leichnam verzehrt haben. In jahrelanger Forschungsarbeit fanden die Paläogenetiker schließlich Wege, die gesuchte aDNA («a» steht für das englische Wort »ancient«, alt) aus diesem Gemisch herauszufischen und wieder zusammensetzen (siehe S. 84). Doch in einem Fossil bleibt aDNA nur dann erhalten, wenn es in einer genügend kalten Umgebung lagerte. In wärmeren Gefilden zersetzt sich die Erbsubstanz schon nach wenigen Jahrtausenden.

Die bislang älteste aDNA hat 2013 ein dänisches Forscherteam um Ludovic Orlando rekonstruiert, der damals am Naturhistorischen Museum in Kopenhagen tätig war. Das Erbgut stammte aus den gefrorenen Resten eines 700000 Jahre alten Wildpferds, das im Nordwesten Kana-

das ans Licht kam. Bald stellte sich heraus, dass auch in Sibirien uralte Genome erhalten sind. Mit einem Team vom Leipziger Institut konnte ich 2007 an Proben aus einer Höhle im Altai-Gebirge nachweisen, dass sich dort vor mehr als 40000 Jahren Neandertaler aufgehalten hatten. Ihr bis dahin bekanntes Ausbreitungsgebiet hatte sich damit schlagartig um mehr als 2000 Kilometer nach Osten ausgedehnt.

Russische Archäologen schickten uns danach weitere Fossilproben aus Sibirien, die in die Zeit vor 52000 bis 76000 Jahren datieren. Dazu gehörte auch das Stück eines menschlichen Fingerknochens mit der Fundnummer Denisova 3. Das winzige Fragment stammte von einer anderen Fundstelle im Altai, die Archäologen schon seit vielen Jahren frei legten: die Denisova-Höhle.

In der Denisova-Höhle ist es kalt: 5 bis 10 Grad Celsius im Sommer und minus 10 bis minus 15 Grad Celsius im Winter. Das sind optimale Bedingungen, damit sich aDNA erhalten kann. In der Tat konnten die Leipziger Paläogenetiker dem wenige Millimeter großen Fingerknochenstück eine intakte und noch dazu sehr außergewöhnliche DNA entlocken. Wie sich herausstellte, gehörte die mtDNA weder zu einem *Homo sapiens* noch zu einem Neandertaler, sondern zu einer ausgestorbenen Menschenform, deren Linie sich nach diesen Informationen schon vor ungefähr einer Million Jahre von der unsrigen abgespalten haben soll.

Das Ergebnis war sensationell, doch zugleich war Vorsicht geboten. Wie wir wissen, verrät die mitochondriale DNA nur einen Teil der genetischen Information, die noch dazu trügerisch sein kann, da die mtDNA normalerweise nur von der Mutter an die Nachkommen vererbt wird. Bei der Zeugung vermischt sich das Genmaterial aus den Mitochondrien demnach nicht mit dem väterlichen Erbgut. Über die Linie der Väter erfahren wir also nichts. Zudem: Pflanzen sich weibliche Lebewesen einer bestimmten mtDNA-Linie nicht mehr fort, stirbt ihre spezifische Gensequenz aus und stellt für Paläogenetiker eine Unbekannte dar.

**Gigantische Backenzähne und grazile Fingerknochen**

Glücklicherweise wartete im Fall des sibirischen Fingerknochens die eigentliche Sensation noch auf uns. So kam gegen Ende des ereignisreichen Jahres 2010 eine weitere Studie heraus. Pääbo und sein Team hatten es geschafft, die vollständige Zellkern-DNA dieses geheimnisvollen Menschen zu entziffern – der umso rätselhafter war, weil außer dem winzigen Knochenfragment nichts über seine Anatomie bekannt war. Dafür lieferte die Zellkern-DNA des Fossils Denisova 3 eine Fülle an Informationen. Zunächst: Dieser Denisovaner war eine Denisovanerin gewesen, ein Mädchen, das angesichts der Größe des Knochenfragments noch nicht erwachsen war. Zudem ergab der Vergleich ihres Erbguts mit den Genomen von Neandertalern und heutigen Menschen, dass sie nah verwandt mit beiden Menschenformen war. Einer genetischen Berechnung zufolge hatten sich die Linien der Denisovaner und der Neandertaler irgendwann vor zirka 450000 oder 430000 Jahren getrennt. Außerdem: Unsere Vorfahren und die

Vorläufer der Denisovaner und Neandertaler hatten sich wahrscheinlich nicht wie zuvor auf Grund der mtDNA angenommen vor einer Million Jahren, sondern vor ungefähr 650 000 Jahren auseinanderentwickelt (siehe Grafik S. 82).

Paläogenetiker weltweit waren begeistert – Paläoanthropologen hingegen ziemlich konsterniert. Ein winziges Fragment vom Endglied eines kleinen Fingers gab wahrlich nicht genug her, was sich anatomisch erforschen ließ. Doch noch 2010 keimte Hoffnung. Der US-Genetiker Richard Green und seine Kollegen präsentierten ein weiteres Fossil, das zehn Jahre zuvor in der Denisova-Höhle ausgegraben, aber danach nicht weiter beachtet worden war.

Es war ein menschlicher, außergewöhnlich großer Backenzahn (Molar). Die Analyse der mtDNA besagte, dass es sich um das Relikt eines Denisova-Menschen handelte. Bence Viola, ein junger Kollege aus meiner Abteilung, befasste sich akribisch mit der Anatomie dieses Riesenzahns. Die Form war zweifellos merkwürdig, indes: Es ist der dritte Molar aus einem Oberkiefer, gehört also zu den Weisheitszähnen – und die entwickeln oft eine außergewöhnliche Form, die sich von den anderen Backenzähnen unterscheidet.

Wenig später förderten die Ausgräber der Denisova-Höhle, Anatoli Derewjanko und Michail Shunkov von der Russischen Akademie der Wissenschaften in Nowosibirsk, weitere fossile Knochenfragmente des Denisova-Menschen zu Tage. Sie fanden die Krone eines stark abgenutzten Milchzahns und einen weiteren Molaren aus einem Oberkiefer, ebenfalls sehr groß. Seiner Form nach passte der Backenzahn weder zu den Zähnen des Neandertalers noch zu solchen des *Homo sapiens*.

## AUF EINEN BLICK EIN NEUES FAMILIENMITGLIED

- 1 2010 ergab die genetische Analyse eines Fingerknochenfragments aus einer Höhle im Altai-Gebirge: In Eurasien hatte während der Altsteinzeit neben *Homo sapiens* und Neandertaler eine dritte Menschenform gelebt, der Denisova-Mensch.
- 2 Durch neue genetische Daten und Fossilien, die Forscher bisher übersehen hatten, nehmen die Denisovaner allmählich Gestalt an.
- 3 Außerdem stellte sich heraus: Die Denisovaner hatten sich nicht nur mit dem Neandertaler vermischt, sondern offenbar auch mit dem *Homo sapiens*.

Bence Viola, der inzwischen an der University of Toronto forscht, hat 2019 ein weiteres Fossil aus der Denisova-Höhle vorgestellt: ein Stück eines auffallend kräftigen Schläfenknochens. Ebenfalls 2019 hat Isabelle Crèvecoeur von der Université de Bordeaux das fossile Fingerglied Denisova 3 durch ein Fragment ergänzt. Am vervollständigten Knochenstück ließ sich erkennen, dass es weniger breit geformt war als bei einem Neandertaler und eher den Fingerknochen von *Homo sapiens* glich.

Alle diese Ergebnisse mündeten in einer weiteren Erkenntnis: Die Denisovaner hatten die Höhle über einen sehr langen Zeitraum aufgesucht. Zwar waren viele Fundschichten durch die Jahrtausende gestört oder durchmischt worden, dennoch ließen sie sich grob datieren und mit den genetischen Daten abgleichen. Das Fazit: Die Denisova-Menschen haben – wenn auch mit Unterbrechungen – mindestens 100 000 Jahre lang in der sibirischen Höhle gelebt, in einem Zeitraum von vor 250 000 bis vor 45 000 Jahren.

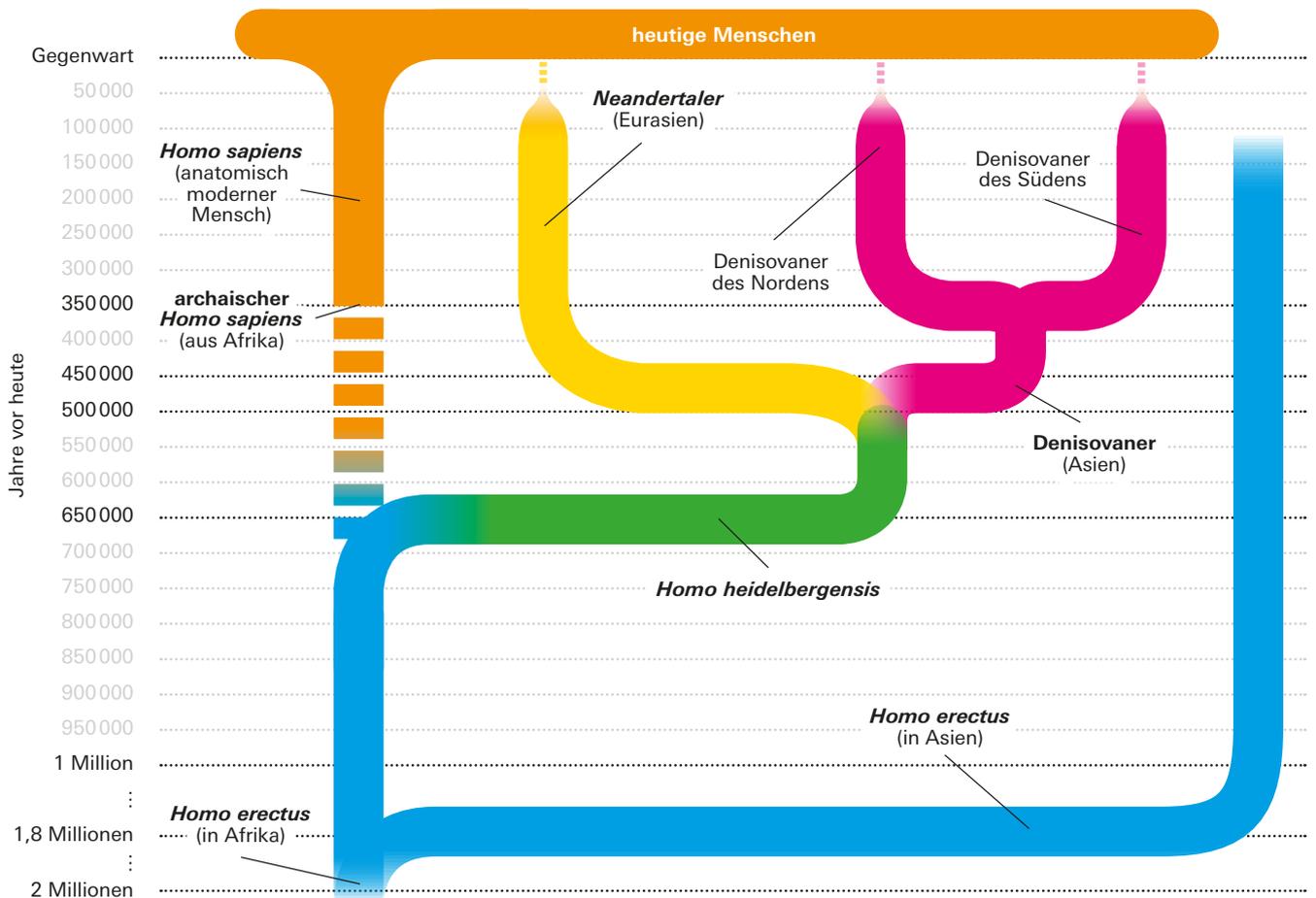
### Der Denisovaner in uns

Die Menschenform der Denisovaner ist ausgestorben – so viel ist sicher –, doch Spuren ihres Erbguts haben die Zeiten überdauert. Sequenzen ihrer Zellkern-DNA fanden sich im Genom verschiedener heutiger Bevölkerungsgruppen. In Afrika und Europa allerdings überhaupt nicht, bei den Menschen des asiatischen Festlands nur sehr wenig – etwa 0,2 Prozent. Aber bei einigen Populationen Melanesiens und Australiens hat sich ein Anteil von drei bis fünf Prozent Denisova-DNA erhalten. Die Vorfahren der heutigen Papuas und der australischen Aborigines, die vor mehr als 50 000 Jahren aus Afrika eingewandert waren, müssen auf ihrem Weg auf Denisovaner getroffen sein und sich mit ihnen vermischt haben. Der wahrscheinlichste Zeitpunkt dieser Vermengung war wohl vor 50 000 bis 100 000 Jahren – und der Ort irgendwo in Süd- oder Südostasien.

Die Denisova-Menschen müssen demnach sehr weit verbreitet gelebt haben – und die Denisova-Höhle im Altai lag nicht im Zentrum, sondern am nördlichen Rand ihres Lebensraums. Diese These wird durch weitere Funde ge-

Meistens ist es kalt im sibirischen Altai-Gebirge. So auch in der Denisova-Höhle, die optimale Bedingungen bietet, damit sich uralte DNA in Fossilien erhalten kann.

BENCE VIOLA, MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH JEAN-JACQUES HUBLIN

stützt. Die russischen Ausgräber sind in den Höhlensedimenten auch auf Überreste von Neandertalern gestoßen. Während der letzten Zwischeneiszeit, vor 130 000 bis vor 80 000 Jahren, wurde das Klima in Zentralasien feuchter, das Kaspische Meer schrumpfte, und im Winter herrschten mildere Temperaturen. Dank dieser Warmphase konnten die Neandertaler aus ihrem westasiatischen Verbreitungsgebiet weit nach Osten vordringen und schließlich den Altai erreichen. Dort verdrängten sie sogar zeitweise die Denisovaner, vermischten sich aber auch mit ihnen.

Den Beweis dafür legte 2019 die Arbeitsgruppe von Svante Pääbo vor. Sie hatte das Bruchstück eines Röhrenknochens aus der Denisova-Höhle genetisch analysiert (Denisova 11). Der Fund ist etwa 90 000 Jahre alt. Pääbo und sein Team fanden heraus, dass der nur zwei Zentimeter große Knochensplitter von einer jungen Frau stammte. Ihre Mutter war eine Neandertalerin gewesen, ihr Vater ein Denisovaner – der selbst alte Spuren von Neandertalervorfahren in seinem Genom trug.

Das hatte es so in der Paläoanthropologie noch nicht gegeben. Die Forschungsdisziplin, die mit dem Fund eines Neandertalerskeletts 1856 im namensgebenden Neandertal begründet wurde und auf der Formanalyse von Fossilien basiert, fand sich in einer paradoxen Lage wieder. Genetiker hatten zahlreiche Erbgutdaten vom Denisova-Menschen gesammelt, aber anatomisch auswertbare Skeletteile und damit Hinweise auf das Aussehen dieser archaischen

**Die Denisovaner gingen wie die Neandertaler aus dem *Homo heidelbergensis* hervor. Sie spalteten sich vor zirka 350 000 Jahren in zwei Populationen auf.**

Menschenform fehlten fast völlig. Diese bizarre Diskrepanz ließ die Paläoanthropologen rätseln: Lagen womöglich längst Denisovaner-Relikte in Sammlungen, ohne dass sie als solche identifiziert wurden? In der Tat gibt es in China zahlreiche menschliche Fossilien, die in Frage kämen. Sie stammen aus dem Zeitraum von vor ungefähr 400 000 bis 45 000 Jahren und würden von der Aufspaltung der Linien der Denisovaner und der Neandertaler bis zu dem Zeitpunkt reichen, als die ersten anatomisch modernen Menschen nach Nordasien vordrangen. Nach Südostasien war *Homo sapiens* wohl schon vor etwa 70 000 Jahren gelangt, nach Australien vor zirka 50 000 Jahren.

Einige meist chinesische Wissenschaftler vertraten schon lange die Ansicht, dass die Völker des Fernen Ostens auch regionale Wurzeln haben. Die Befürworter dieser These interpretierten die chinesischen Fossilien als Mischformen zwischen dem *Homo erectus* – er war vor etwa zwei Millionen Jahren aus Afrika in Eurasien eingewandert – und einem regionalen *Homo sapiens*.

Doch zuletzt sprachen sich immer mehr Forscher für den afrikanischen Ursprung unserer Spezies aus. Folglich fand die These von der »regionalen Kontinuität« immer weniger

Befürworter. So wussten die Paläoanthropologen aber auch immer weniger mit den chinesischen Fossilien anzufangen. Schon 2010, als die ersten Studien über den Denisova-Menschen erschienen, haben Chris Stringer vom Natural History Museum in London und ich vorgeschlagen, dass es sich bei den teils sehr gut erhaltenen chinesischen Fossilien um Überreste von Denisovanern handeln könnte. Es fehlte aber ein genetischer Nachweis für unsere These. Daher blieb es nur eine plausible Vermutung.

Das änderte sich im Juli 2016. Ich hatte per E-Mail mehrere Fotos erhalten und anbei die Nachricht einer chinesischen Kollegin, Dongju Zhang von der Universität Lanzhou. Die Bilder zeigten ein Fossil von der Tibetischen Hochebene – es war die Hälfte eines Unterkiefers. Das Stück wirkte sehr robust, und in der Zahnreihe steckten zwei enorm große Backenzähne. Es war kein Kinn zu erkennen. Damit war klar: Das konnte kein *Homo sapiens* sein! Die überraschende E-Mail aus China war der Beginn einer wunderbaren Zusammenarbeit mit Dongju Zhang und ihrem Kollegen Fahu Chen.

Hätte der Cartoonist Hergé den fragmentierten Unterkiefer gekannt, er hätte ihm einen gebührenden Platz in seinem Comicalbum »Tim in Tibet« eingeräumt. Die Fundgeschichte des Fossils hat jedenfalls das Zeug für eine fantastische Erzählung. In den frühen 1980er Jahren war ein buddhistischer Mönch zum Meditieren in das Höhlenheiligtum von Baishiya im Bezirk Xiahe aufgestiegen. In der Karsthöhle fand er dann das Fossil und brachte es zum »Sechsten lebenden Gung-Thang-Buddha«. Der Unterkiefer sollte zu einem Puder für medizinische Zwecke zerstoßen werden. So war man jedenfalls mit sämtlichen fossilen Knochen verfahren, die bis dahin in der Höhle ans Licht gekommen waren. Doch der religiöse Würdenträger bewahrte das Stück auf. Irgendwann überließ er es einem chinesischen Geologen aus seinem Bekanntenkreis. Schließlich landete das Fossil an der Universität Lanzhou. Wo genau es der Mönch in der Höhle aufgelesen hatte, wusste niemand mehr, aber zumindest das Alter des Unterkiefers ließ sich bestimmen. An dem Fossil haftete eine Kruste aus Kalzitgestein, der die chinesischen Kollegen

mittels der Uran-Thorium-Methode eine Datierung entlockten: 160 000 Jahre. Alle Indizien – das Alter, die Fundregion und die morphologischen Merkmale – sprachen dafür, dass der Unterkiefer von einem Denisova-Menschen stammte.

Nicht nur das Fossil war bemerkenswert, sondern auch sein Fundort. Die Karsthöhle von Baishiya liegt auf fast 3300 Meter über dem Meeresspiegel. Bis dahin existierte kein einziges Fossil einer archaischen Menschenform, das in hochalpinen Lagen zu Tage kam. Zuvor gingen Paläoanthropologen davon aus, dass *Homo sapiens* vor weniger als 40 000 Jahren die Tibetische Hochebene als Erster erklommen hatte.

### Woher das Gen gegen dünne Luft kommt

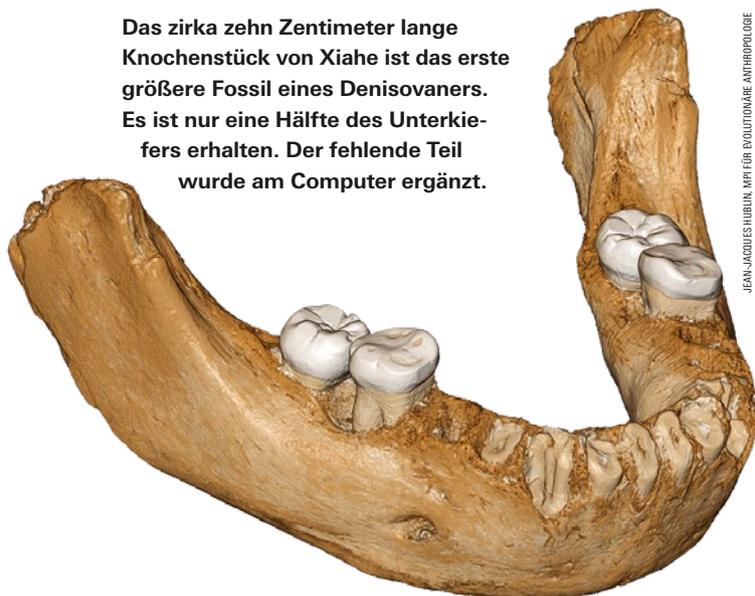
Qiaomei Fu vom Institut für Wirbeltierpaläontologie und Paläoanthropologie der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking versuchte, aus dem Unterkiefer von Xiahe aDNA zu extrahieren – leider erfolglos. Also probierten wir es mit einer anderen Methode: der Paläoproteomik. Sie beruht auf dem Bindegewebeisweiß Kollagen im Knochen. Die Untersuchung des Proteins hat im Vergleich zur aDNA zwei entscheidende Vorteile: Die Aminosäureketten, aus denen Proteine bestehen, sind sehr viel stabiler als die Nukleinsäure einer DNA und überdauern daher sehr viel länger. Und zweitens: Die Abfolge der Aminosäuren entspricht der DNA-Sequenz, die das Eiweiß codiert – denn die Gene enthalten die Bauanleitung für ein Eiweiß. Hierüber ist es möglich, einen fossilen Knochen einem *Homo sapiens*, Neandertaler oder Denisovaner zuzuordnen.

Mit Hilfe der Paläoproteomik gelang es uns tatsächlich, Eiweißfragmente aus dem Unterkiefer zu extrahieren. Frido Welker aus meiner Arbeitsgruppe verglich nun die Proteinbausteine mit der DNA der Denisovaner. Im Mai 2019 machte er eine passende Sequenz ausfindig. Erstmals hatten wir einen Denisovaner außerhalb der Denisova-Höhle entdeckt – 2000 Kilometer entfernt in Tibet!

Das Kieferstück von Xiahe löste noch ein weiteres Rätsel. Viele Tibeter tragen in ihrem Erbgut eine besondere Spielart des Gens EPAS1. Das von ihm codierte Protein erleichtert den Sauerstofftransport im Körper. Dank dieser Genvariante sind die Tibeter sehr gut an das Leben in der sauerstoffarmen Luft des Hochlands angepasst. Wie Paläogenetiker 2014 herausgefunden hatten, gehört EPAS1 zu einer Hand voll von Genen, die asiatische Bevölkerungsgruppen von den Denisovanern geerbt hatten. Das erschien jedoch zunächst widersinnig, liegt die Denisova-Höhle doch lediglich auf einer Höhe von rund 700 Meter. Menschen, die dort lebten, brauchten keine Gene zur Höhenanpassung. Das Xiahe-Fossil führte endlich die losen Enden zusammen: Die genetische Selektion für dieses Merkmal hatte bei den Denisova-Menschen viel weiter südlich stattgefunden, am Rand des Himalajas.

Der Unterkiefer lüftete auch das Geheimnis um die Morphologie der Denisovaner – zumindest teilweise. Wir verglichen das denisovanische Knochenstück von Xiahe mit anderen in China gefundenen Fossilien. In vielen Merkmalen stimmte es mit einem weiteren halben Unterkiefer überein, der in Penghu vom Grund des Chinesischen Meeres gefischt wurde, in der Meerenge zwischen Taiwan und dem Festland.

**Das zirka zehn Zentimeter lange Knochenstück von Xiahe ist das erste größere Fossil eines Denisovaners. Es ist nur eine Hälfte des Unterkiefers erhalten. Der fehlende Teil wurde am Computer ergänzt.**



JEAN-JACQUES HUBLIN, MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

Beide Fossilien sind ungefähr gleich groß und haben – im Unterschied zum Oberkiefer – keinen dritten Backenzahn, anders als wir es von der großen Mehrheit der archaischen Menschenformen kennen. Der Penghu-Unterkiefer hatte also sehr wahrscheinlich zu einem Denisova-Menschen gehört.

Bei den Backenzähnen sticht zudem ein besonderes Merkmal hervor: Der zweite Molar hat drei statt zwei Zahnwurzeln. Im heutigen Europa und Afrika ist dieser Sonderfall kaum verbreitet, aber bei zirka 40 Prozent der Chinesen und amerikanischen Ureinwohner – die ja aus Nordasien abgewandert waren – steckt ein zweiter Molar mit drei Wurzeln im Unterkiefer. Gut möglich, dass die Denisova-Menschen dieses Merkmal ebenfalls vererbt haben.

Wir entdeckten im Reich der Mitte noch weitere Riesenzähne: an der Fundstätte Xujiayao westlich von Peking. Das Alter dieser Zähne ist stark umstritten, die Datierung ran-

giert zwischen 260000 und 370000 Jahren. Es existieren zudem gut erhaltene Schädelossilien, die ebenfalls Ähnlichkeiten mit dem Unterkiefer von Xiahe aufweisen. Was diese Fossilien gemeinsam haben, sind eine sehr große Schädelhöhle und Knochenmerkmale, die an den Neanderthaler erinnern, sich aber auch deutlich von ihm unterscheiden. Dazu gehören die Schädelfragmente aus Lingjing in der Region Xuchang (Provinz Henan). Paläoanthropologen stellten die Fossilien 2017 der Öffentlichkeit vor und datierten sie auf 105000 und 125000 Jahre vor heute. Als Denisovaner kommt auch ein Schädel mit der Bezeichnung Maba 1 in Frage, der 1958 nahe der Stadt Shaoguan (Provinz Guangdong) entdeckt wurde. Das Alter: 130000 bis 240000 Jahre. Das Gleiche gilt für einen Schädel, der 1933 in den Sedimenten des Songhua-Flusses nahe der Stadt Harbin ans Licht kam. All diese Fossilien weisen dieselben Merk-

## So funktioniert die Paläogenetik

### 1. Die Vorbereitung einer Knochenprobe

Die Paläogenetiker pulverisieren zunächst mit einem Bohrer einen kleinen Teil des Inneren eines fossilen Knochens. Das so gewonnene Bohrmehl enthält eine Mischung aus alter und junger, verunreinigender DNA. Der weitaus größte

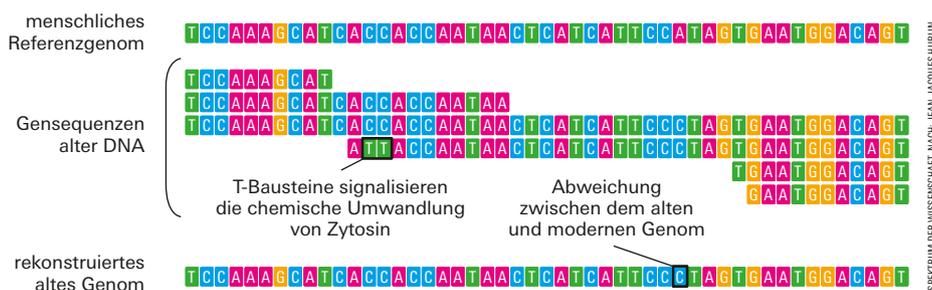
Teil stammt von Pilzen, Bakterien und anderen im Boden lebenden Mikroorganismen, die den Leichnam besiedelt und das weiche Gewebe zersetzt haben. Aber auch DNA von heutigen Menschen kann trotz aller Vorsicht am Fundort und im Umgang mit dem Fossil in die Probe geraten sein.

### 2. Die Extraktion der DNA

Das Bohrmehl gibt man nun in eine enzymhaltige Lösung, um das Knochenmaterial vollständig aufzulösen. Dann kommt das Gemisch in eine Zentrifuge, damit unlösliche Knochenreste von der DNA-haltigen Lösung getrennt werden. Danach mischen Genetiker ein Salz und einen Alkohol hinzu. Beides hilft, selbst die kleinsten DNA-Bruchstücke zu gewinnen. Das ist ein wichtiger Schritt, da im Lauf der Jahrtausende die alte DNA sehr stark fragmentiert wurde. Die Lösung wird anschließend durch eine Silikamembran gefiltert, in der die DNA hängen bleibt. Nun kommt die gereinigte DNA erneut in eine Lösung.

### 3. Die Aufbereitung der DNA-Fragmente

Die Paläogenetiker fügen der Lösung mit den DNA-Fragmenten »Adapter« hinzu. Diese hängen sich als Markie-



rungen jeweils an den Anfang und das Ende eines DNA-Fragments. Die Adapter bestehen aus Oligonukleotiden, also kurzkettigen DNA-Bausteinen, die das Sequenziergerät später zweifelsfrei erkennt. Anschließend vervielfältigen die Genetiker die markierten DNA-Fragmente mit Hilfe eines Enzyms, das eine Vielzahl identischer Kopien herstellt. Der Prozess wird als »Polymerase-Kettenreaktion« oder »Polymerase Chain Reaction«, kurz PCR, bezeichnet. Nur wenn es gelingt, eine hinreichend große Anzahl von Kopien zu produzieren, ist das folgende Sequenzieren erfolgreich.

### 4. Das Sequenzieren

Die DNA-Fragmente werden nun in ein Sequenziergerät gegeben, das bei jedem Erbsubstanzschnipsel die Abfolge der DNA-Bausteine (Nukleotide) registriert. Eine Software gibt sie als Ketten aus den vier Buchstaben A, T, G und C wieder, die stellvertretend für die vier in den Nukleotiden enthaltenen Basen Adenin, Thymin, Guanin und Zytosin stehen.

### 5. Die Rekonstruktion der DNA

Leistungsstarke Computer vergleichen als Nächstes die erhaltenen kurzen DNA-Sequenzen mit ein oder zwei

male auf: ein großes Schädelvolumen und neandertalerähnliche Züge. Meines Erachtens sind sie alle Schädelreste von Denisova-Menschen.

Immer mehr Paläoanthropologen schließen sich unserer These an, dass ein großer Teil der chinesischen Menschenfossilien tatsächlich von Denisovanern stammen – allerdings von ihrer nördlichen Gruppe. Denn Paläogenetiker haben vor zwei Jahren hunderte Genome moderner Menschen nach den Einsprengeln von Denisovanern untersucht. Ihr Ergebnis: Nicht alle Asiaten tragen die gleichen Genvarianten der Denisovaner in ihrem Erbgut. Im Genom der heutigen Südostasiaten stecken beispielsweise keine Spuren der denisovanischen aDNA aus der namensgebenden Höhle.

Aus den Genanalysen geht hervor, dass mindestens zwei geografisch voneinander getrennte Gruppen von Denisovanern existiert haben müssen, die sich schon vor rund

bekanntem menschlichen Genomen, dem so genannten Referenzgenom (siehe Grafik links). Dabei rekonstruiert die Software auch Teile der alten DNA, da sich selbst bei unterschiedlichen Menschenformen die DNA-Sequenzen sehr stark ähneln. Um Verunreinigungen ausfindig zu machen, suchen die Computeralgorithmen in der alten DNA gezielt nach Fehlerstellen. Deren Ursache ist ein natürliches Phänomen: Die Nukleinbase Zytosin kann sich nämlich nach vielen Jahrtausenden in Uracil umwandeln. Das Sequenziergerät registriert das Uracil aber als vermeintliches Thymin. Wirft das Gerät nun an sehr vielen Stellen Thymin aus, an denen das Referenzgenom aber Zytosin aufführt, signalisiert das dem Forscher: Diese DNA ist tatsächlich sehr alt.

## 6. Die Identifikation einer Spezies

Eine weitere Software vergleicht schließlich das rekonstruierte Genom mit vielen anderen Erbgutsätzen. Gezielt suchen die Genetiker nach punktuellen Abweichungen – nach so genannten Single Nucleotide Polymorphisms, kurz SNPs (gesprochen: Snips). Je mehr solcher SNPs vorhanden sind, desto größer ist die Chance, dass die verglichenen Genome zu unterschiedlichen Menschenformen gehören.

Generell gibt es nur wenige SNPs bei Individuen, die ein und derselben Spezies angehören – innerhalb von *Homo sapiens* ist das nur bei etwa jedem 1000. DNA-Baustein der Fall. Die Genome von Mensch und Schimpanse hingegen unterscheiden sich ungefähr an jeder 100. Stelle. Vergleicht man die DNA des anatomisch modernen Menschen mit der eines Neandertalers oder Denisovaners, zeigt sich etwa an jeder 700. Stelle ein Unterschied. Auch die Genome von Neandertaler und Denisovaner sind verschieden genug, um sie tatsächlich als getrennte Menschenformen zu identifizieren. Und Gleiches gilt für die Nord- und die Südgruppe der Denisova-Menschen.

350 000 Jahren voneinander getrennt hatten – also bereits relativ bald nach der Abspaltung der Denisova-Menschen von der Linie der Neandertaler, was nach aktuellem Wissensstand vor zirka 450 000 Jahren geschehen war. Die nördliche Gruppe umfasste die Individuen aus der sibirischen Denisova-Höhle und einen großen Teil der Denisovaner auf dem Gebiet des heutigen China. Von der südlichen Gruppe hingegen sind Fossilien extrem spärlich gesät. Aus Südostasien kennen wir abgesehen von ein paar vermutlich menschlichen Zähnen praktisch keine Überreste, die sich den südlichen Denisovanern zuweisen ließen. Ihre Gruppe verrät sich allein durch die Einsprengel in den Genomen heutiger Melanesier und australischer Ureinwohner. Diese weisen durchschnittlich vier Prozent Süd-Denisovaner-DNA auf. Die eingekreuzten Genvarianten sind unter den Menschen in Asien sonst unterschiedlich verteilt. Bei den heutigen Japanern und Chinesen etwa finden sich Spuren von beiden Denisova-Gruppen, die jeweils 0,1 Prozent beisteuerten.

## Die Jagd nach Fossilien

Auch wenn das Aussehen der südlichen Denisovaner noch völlig im Dunklen liegt, so lässt sich zumindest eine plausible Überlegung dazu anstellen. Wenn beide Gruppen sich bereits von 350 000 Jahren gebildet hatten, dann haben sie sich über einen sehr langen Zeitraum getrennt voneinander entwickelt. Eine Folge war möglicherweise, dass sich die Denisovaner des Nordens und des Südens äußerlich so sehr voneinander unterschieden wie beide ihrerseits von den Neandertalern.

Zurzeit konzentrieren wir unsere Forschungen vor allem auf die Fossilien und Fundstätten in China. Wir versuchen, die Denisovaner mit Hilfe der Paläoproteomik aufzuspüren, und prüfen, ob sich in den Knochen aDNA erhalten hat. Eine weitere, relativ neue Methode, die Kollegen vom Max-Planck-Institut in Leipzig entwickelt haben, kommt uns dabei zupass: der Nachweis von aDNA in Bodenproben. Denn DNA bleibt nicht nur in fossilen Knochen erhalten, sondern auch in Sedimenten. Selbst wenn ein Toter vollständig zerfallen ist oder ein altsteinzeitlicher Mensch in einer Höhle bloß seine Exkremate hinterließ, blieb seine DNA anschließend an bestimmten Bodenbestandteilen haften. Diese Spuren lassen sich nachweisen und einer Urmen-schenform zuweisen. Paläoanthropologen arbeiten nun fieberhaft daran, in Süd- und Südostasien endlich auf Relikte der südlichen Denisovaner zu stoßen. Deren Aussehen ist ja weiterhin völlig unbekannt. Wir haben in Asien also noch etliche Geheimnisse zu lüften. ◀

## QUELLEN

**Bailey, S. E. et al.:** Rare dental trait provides morphological evidence of archaic introgression in Asian fossil record, PNAS 116, 2019

**Chen, F. et al.:** A late Middle Pleistocene Denisovan mandible from the Tibetan Plateau. Nature 569, 2019

**Jacobs, G. S. et al.:** Multiple deeply divergent Denisovan ancestries in Papuans. Cell 177, 2019

**Slon, V. et al.:** The genome of the offspring of a Neanderthal mother and a Denisovan father. Nature 561, 2018

# REZENSIONEN

## GESCHICHTE AUFSTIEG EINER SAGENHAFTEN METROPOLE

Ein Archäologe und Althistoriker schildert, wie Rom von einer Hüttenansammlung zu einer »Stadt aus Marmor« wurde.

► Rom wurde bekanntermaßen nicht an einem Tag erbaut. Aber wie lange es dauerte, bis aus einer Hüttenansammlung die Metropole eines Weltreichs wurde und wie sich die Stadt und ihre Menschen dabei immer wieder veränderten und doch ihre Wurzeln nie aus den Augen verloren, erzählt der französische Archäologe und Althistoriker Alexandre Grandazzi in diesem herausragenden Werk. An

Veröffentlichungen zum Römischen Reich mangelt es sicher nicht, doch selten ist so detailliert, vielseitig, anschaulich und dennoch kompakt die Entwicklung des Imperiumkerns nachgezeichnet worden.

Grandazzi gelingt es, die antike Metropole als lebendigen und wachsenden Organismus zu porträtieren. Bewohner, Gebäude, Stadtteile, Institutionen verschmolzen in den steinernen und sakralen Grenzen der Stadt zu einem pulsierenden Wesen, wie aus seinem Buch hervorgeht. Der Autor, der an der Pariser Sorbonne lehrt, konzentriert sich auf die Epochen von der Gründung Roms bis zur Kaiserzeit, genauer gesagt bis zum Tod Augustus' – auf die Zeit also, in

der das Fundament des Weltreichs gelegt wurde.

Eine große Rolle in Roms Entwicklung spielten die geografischen und geologischen Gegebenheiten, die schon die ersten Siedler dazu motivierten, sich in dem Gebiet niederzulassen. Grandazzi räumt die berühmten Hügel zu Beginn seines Werkes noch einmal fiktiv frei und beschreibt sehr bildhaft, welche Landschaftsmerkmale schon die ersten Bewohner rund um das 12. Jahrhundert v. Chr. dazu brachten, hier zu bleiben – und zwar zunächst in einzelnen Hütten, verteilt auf Palatin und Kapitol. Sie waren vornehmlich Viehzüchter, profitierten aber

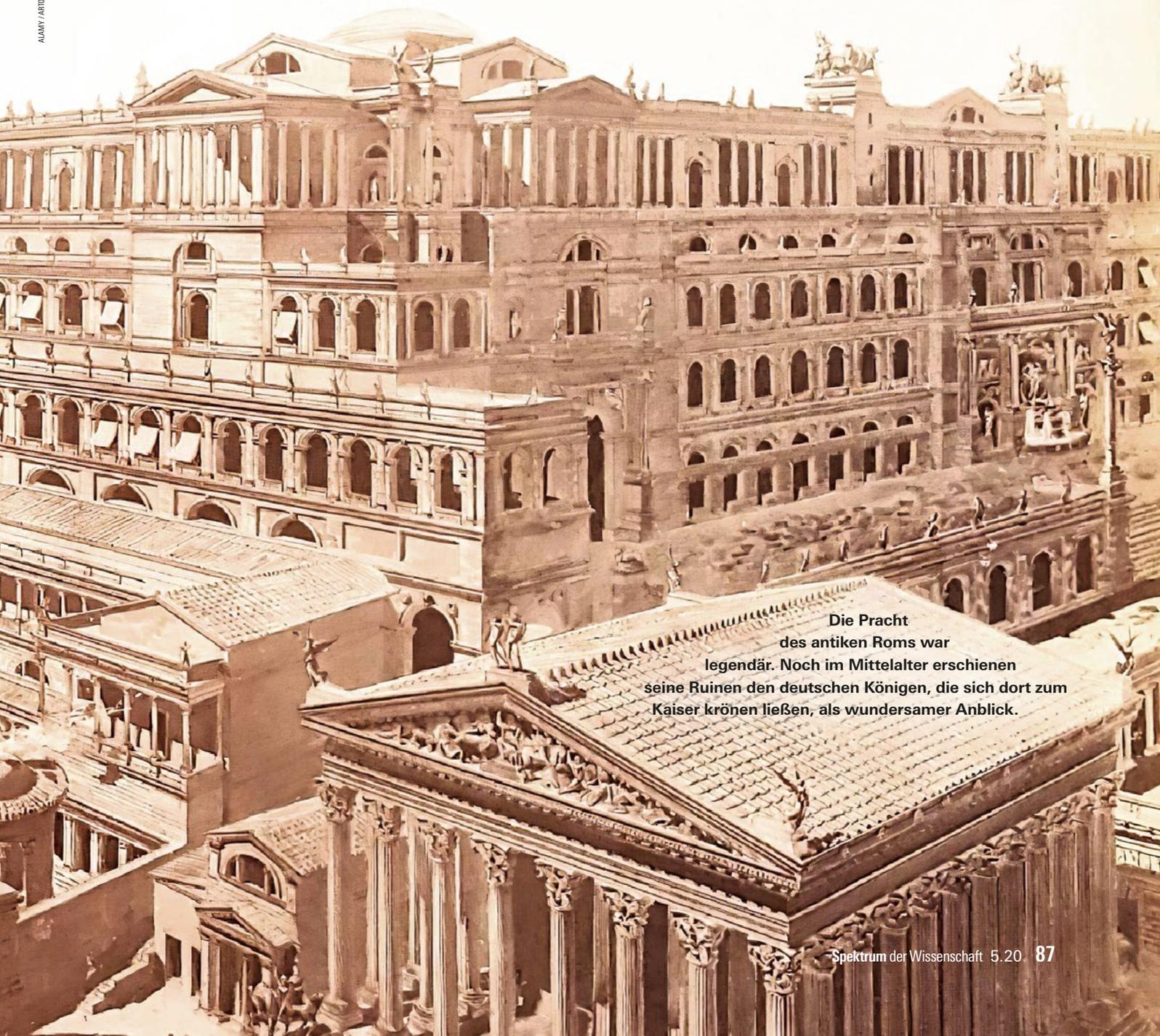
ALAMY / ARTINDO/ORB



auch von der Nähe zu zwei Gewässern. Denn das Gebiet, auf dem schließlich Rom entstand, lag an einer strategisch günstigen Stelle: Hier, auf halber Strecke zwischen dem Meer im Westen und den Albaner Bergen im Osten – »dem damals florierenden Zentrum der Region« –, ließ sich der Tiber durch eine Furt queren. Wichtige Verbindungswege in alle Himmelsrichtungen kreuzten sich dort, Menschen begegneten sich und trieben Handel, vor allem mit dem Salz, das sie nahe der Mittelmeerküste gewonnen hatten.

Welche herausragende Bedeutung gerade die Anfangsjahre für die weitere Entwicklung der Stadt – und ihr Anspruchsdenken – haben, verdeutlicht die Herkunft der Bezeichnung »Urbs«. Grandazzi greift in seiner ausführlichen »Archäologie eines Wortes« die Theorie auf, dass zwei Wörter von hethitischen und luwischen Tontafeln die indoeuropäische Quelle des Begriffs darstellen: Aus »Warpa dai« gehe die lateinische Formel »urbem condere« – »eine Stadt gründen« – hervor. Die hethitische Formulierung bedeutet so viel wie »einen Umkreis abstecken«,

was »neben profanen Verwendungen zunächst einen rituellen, sakralen Akt beschreibt«. Eine solche religiöse Handlung habe ebenfalls den Weg nach Italien gefunden und den Beginn der Geschichte Roms markiert: Im 8. Jahrhundert v. Chr. begannen die Bewohner des Palatins sich als Einheit zu begreifen und gründeten eine gemeinsame Siedlung, indem sie diese symbolisch mit einer Ackerfurche umgrenzten. »Ein bereits mehrere Jahrhunderte währender, allmählicher Prozess hatte den Boden für die nun endlich möglich gewordene Gründung eines geschlos-



Die Pracht des antiken Roms war legendär. Noch im Mittelalter erschienen seine Ruinen den deutschen Königen, die sich dort zum Kaiser krönen ließen, als wundersamer Anblick.

# REZENSIONEN

senen Raums bereitet, dem der Ritus der allerersten Furche (...) den Namen Urbs verleihen sollte.« Seit diesem Zeitpunkt sei das Gemeinwesen bestrebt gewesen, »sich als die Stadt zu manifestieren«. Offensichtlich ist ihr das auch gelungen, denn obwohl der Begriff »Urbs« etymologisch nicht allein Rom vorbehalten sein musste, so bezieht sich die Bezeichnung doch fast ausnahmslos auf die Metropole am Tiber.



Wissenschaftler sind sich nicht einig, ob eine solche Gründungszeremonie je stattgefunden hat oder ins Reich der Mythen gehört, wo Romulus als Stadtgründer das Gespann für die Furche selbst führte. Grandazzi sieht nicht zuletzt in der kontinuierlichen Jahreszählung »ab Urbe condita« – seit Gründung der Stadt –, wie es auf offiziellen Dokumenten noch in der Republik und Kaiserzeit heißt, einen Beweis für einen rituell gekennzeichneten Anfangspunkt.

Im Folgenden betrachtet er Roms historisches Fortschreiten ganzheitlich als eine Kombination städtebaulicher, politischer und gesellschaftlicher Prozesse, hebt aber immer wieder hervor, wie einzelne Etappen sich dabei häufig in rituellen Handlungen und Festen manifestierten. Dieses Zusammenspiel unterschiedlicher Bereiche schuf eine einmalige kollektive Identität. Militärische Erfolge und Niederlagen gestalteten das Stadtbild neu, brachten beispielsweise neue Heiligtümer hervor. Bevölkerungswachstum und Entwicklungen in der gesellschaftlichen Ordnung machten immer wieder neue Verwaltungsstruk-

turen erforderlich, wie etwa die als Tribus bezeichneten Wahlbezirke. Politische Wechsel, zum Beispiel zwischen Königszeit und Republik, brachten ebenfalls Neuerungen mit sich – manchmal auch nur kurzfristige. So ließ Julius Cäsar nach seinem Sieg über Pompejus auf dem Marsfeld ein Bassin ausheben, um hier eine Seeschlacht nachzustellen.

Wie in einer steinernen Chronik liest Grandazzi im Stadtbild des antiken Roms, greift dabei auf Schriftquellen zurück und geht als exzellenter Kenner der Materie auf aktuelle Forschungs- und Grabungsergebnisse ein. Mit fortschreitender Entwicklung des Reichs schaut der Autor zwangsläufig auch über die Stadtmauern hinaus, verliert aber nicht den Fokus auf die Geschichte der Metropole. »Urbs, das meint hier den Staat, die gesamte politische und menschliche Gemeinschaft unter der Macht, die von jenem Ort ausstrahlt, an dem alles seinen Anfang nahm und zu dem alles wieder zurückkehrte: die Stadt Rom, deren Name zur Bezeichnung eines Reiches und einer Zivilisation geworden war«, schreibt er. Dabei nimmt er Bezug auf die Worte, die Augustus kurz vor seinem Tod geäußert hatte und wonach dieser die Stadt, die er aus Ziegeln vorfand, nun aus Marmor zurücklasse.

Stellenweise neigt Grandazzi zum Pathos und zum Appell, doch ist das ein Ausdruck der großen Leidenschaft des Wissenschaftlers für sein Thema. Die lebendige Schreibweise und die hohe sprachliche Qualität haben sicherlich dazu beigetragen, dass »Urbs« in Frankreich mit dem angesehenen Prix Chateaubriand ausgezeichnet wurde. Der Autor gibt seinen Lesern 13 Karten an die Hand, mit deren Hilfe sich die verschiedenen Entwicklungsphasen nachvollziehen lassen. Weiteres Bildmaterial wäre zwar wünschenswert gewesen, hätte den Rahmen des Buches aber wohl gesprengt. Zur Vertiefung ist neben dem Register im Anhang auch eine umfangreiche Literaturliste zu finden.

Der Rezensent Sebastian Hollstein ist Wissenschaftsjournalist in Jena.

## DIGITALISIERUNG FACEBOOK VON NAHEM

**Der Journalist Steven Levy erzählt die Geschichte des Weltunternehmens und seines Gründers Mark Zuckerberg.**

Facebook ist mit 2,9 Milliarden Nutzern die größte Organisation der Welt – größer beispielsweise als die römisch-katholische Kirche, der etwa 1,3 Milliarden Menschen angehören. Der Tech-Konzern ist zu einer Weltmacht aufgestiegen mit einer Marktkapitalisierung, die zeitweise das Bruttoinlandsprodukt von Schweden überstieg. Trotz dieser Größe erscheint Facebook, das seinem Namen nach Buch über Gesichter führt, seltsam gesichtslos. Man kommt mit dem Unternehmen nur am Bildschirm in Kontakt.

Der Journalist Steven Levy wirft in seinem neuen, nun auch auf Deutsch erschienenen Buch »Weltmacht am Abgrund« einen Blick hinter die Kulissen des Konzerns. In 19 fakten- und anekdotenreichen Kapiteln erzählt er die Geschichte des Unternehmens und seines Gründers Mark Zuckerberg. Das reicht von Zuckerbergs Kindheit in einem New Yorker Vorort, dessen Studentenleben in Harvard, den Anfängen der Firma in der Casa Facebook (einem Ferienhäuschen mit Pool im Garten) über die geschäftliche Expansion bis hin zu den jüngsten Unternehmenskrisen wie dem Datenskandal um die Analysefirma Cambridge Analytica.

Der Autor hat Zuckerberg erstmals im März 2006 kennen gelernt. Damals war er für das Magazin »Newsweek« als Technik-Reporter tätig und arbeitete an einem Artikel über das Web 2.0. Seither hat er »Mr. Facebook« auf Konferenzen und Foren immer wieder getroffen und begleitet. In diversen

**Zuckerberg programmierte ein Spiel, in dem er stets gegen Julius Cäsar gewann**

Gesprächen hat er nicht nur einiges über die Persönlichkeit Zuckerbergs erfahren, sondern auch Hintergrundkenntnisse über das Unternehmen erworben. Von diesem Insiderwissen profitiert das Buch.

Besonders instruktiv sind die ersten Kapitel über Zuckerbergs Kindheit und Jugend. Levy schreibt, dass schon Zuckerbergs Vater Ed, studierter Zahnarzt, ein Nerd gewesen sei, der Journalisten über 125000 Dollar teure Dentalgeräte unterrichtete. Seinem Sohn gab er eine ausgeprägte Technikaffinität mit auf den Weg. Mark spielte bereits als kleiner Junge mit dem alten Atari-Computer des Vaters; in der 6. Klasse bekam er seinen eigenen Rechner. Der schwächliche Junge mochte Mathematik und Computerspiele, nur gefiel ihm nicht, dass er dabei an Regeln von anderen gebunden war. Also programmierte er die Spiele kurzerhand um und schuf sich eine eigene Welt, die seinen Regeln gehorchte. So entwickelte er eine Digitalversion des Brettspiels »Risiko«, in der er als Spieler gegen Julius Cäsar antrat. Der Sieger hieß immer Mark. Unter anderem hierin zeigt sich, dass in dem jungen Zuckerberg bereits viel vom älteren steckt: einem Programmierer, der der Community Spielregeln diktiert.

»Von Anfang an benutzte Zuckerberg den Computer dazu, um der Frage nachzugehen, wie Menschen sich selbst organisieren – und wie manche von ihnen dabei Macht ansammeln«, schreibt Levy. »Als Zuckerberg anfang, sich für Computerspiele zu interessieren, ging er ganz in seinen Weltenschöpfer-Fantasien auf.« Der Autor erzählt, wie der junge Mark mit seinem Vater eine internetbasierte Sprechanlage im Elternhaus installierte, die signalisierte, wenn jemand den Raum betrat – eine Art analoges Tracking. Dieses vernetzte System, auf den Namen »ZuckNet« getauft, ermöglichte es ihm, seiner Schwester Randi hin und wieder einen Streich zu spielen. Hier lässt sich bereits die große Vision erahnen: die Vernetzung und spielerische Überwachung, die Facebook später zum milliardenschweren Geschäftsmodell machte.

Spannend lesen sich auch Levys Ausführungen zu Facebooks Data-Science-Team, in dem Daten- und Sozialwissenschaftler das Verhalten von Facebook-Nutzern analysierten, um die Wachstumsvorgaben zu erfüllen. »Für die Sozialwissenschaftler war Facebook sozusagen die Datenbank Gottes. Man hatte zwei Milliarden Menschen quasi in der Petrischale.« Der Autor beschreibt, wie das Datenschürfen außer Kontrolle geriet. Als der »Guardian« im Dezember 2015 berichtete, gestohlene Facebook-Profile seien für die Kampagne des damaligen amerikanischen Präsidentschaftskandidaten Ted Cruz eingesetzt worden, habe dies die Facebook-Führung »wie ein Blitz aus heiterem Himmel« getroffen. Das Management, so liest man zwischen den Zeilen, hatte die Sache nicht mehr im Griff. Levy zitiert einen Facebook-Mitarbeiter mit den Worten: »Das war echt Wildwest. Der Typ hatte Zugang zu den Daten, und wir haben einfach nicht gerafft, was er damit anstellte.« Es ist ein Gefühl, das sich oft bei der Lektüre einschleicht: dass Zuckerberg und seine Mitstreiter eine Maschinerie erschaffen haben, die sie selbst nicht mehr kontrollieren können.



Levy hat ein sehr eindrückliches und spannendes Buch über eines der wichtigsten Unternehmen dieser Zeit geschrieben. Es ist unterhaltsam, ohne geschwätzig zu sein. Allerdings lässt die Übersetzung hier und dort zu wünschen übrig, vermutlich, weil sie unter großem Zeitdruck entstanden ist – darauf deutet jedenfalls der Umstand hin, dass sechs (!) Übersetzer an dem Werk mitgewirkt haben.

Generell ist der fast 700 Seiten dicke Wälzer etwas zu lang geraten. Manche Passagen etwa zu den Anhörungen im US-Kongress hätte man straffen können. Dennoch wird die Lektüre nie langweilig, weil der Autor immer wieder Anekdoten und Zitate aus Gesprächen mit Zuckerberg einfließt. Wer etwas über die Hintergründe von Facebook und seines Gründers erfahren will, wird dieses Buch mit Gewinn lesen.

Der Rezensent Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg und ist Autor der Kolumne »Lobes Digitalfabrik« auf »Spektrum.de«. Vor Kurzem erschien sein Buch »Speichern und Strafen: Die Gesellschaft im Datengefängnis«.

## HUMANGENETIK MENSCH 2.0?

**Mit »Designer-Babys« könnte uns eine folgenreiche humangenetische Revolution bevorstehen, wie aus diesem Buch hervorgeht.**

► In nicht allzu ferner Zukunft könnte es möglich sein, »Designer-Babys« zu erschaffen. Wie werden die Menschen damit umgehen? Der amerikanische Publizist Jamie Metzl widmet sich auf mehr als 400 Seiten dieser spannenden Frage. Als Senior Fellow eines Thinktanks und früherer Berater der Clinton-Regierung in Sachen Informationstechnologie und öffentliche Angelegenheiten ist er sich sicher, dass die humangenetische Revolution die Menschheit für immer verändern wird. Mit seinem kurzweiligen Sachbuch »Der designte Mensch« schafft er es, die Aufmerksamkeit auf dieses wichtige Thema zu lenken. Gut verständlich vermittelt er fundiertes Hintergrundwissen zur Humangenetik und regt zum Nachdenken an.

Zu Beginn unternimmt Metzl eine Reise durch die Geschichte der Genetik, von Darwin und Mendels Vererbungslehre bis zur Aufklärung der DNA-Struktur und den Genome-Editierungstechniken wie CRISPR-Cas. Leichtfüßig erklärt er seinen Lesern die fachlichen Grundlagen: den Aufbau von Chromosomen und Genen etwa oder die Funktion von Proteinen. Auch schwierige Begriffe wie Einzelnukleotid-Polymorphismen werden hier nachvollziehbar,

# REZENSIONEN

selbst für Leser, die nicht näher mit dem Gebiet vertraut sind. Die Lektüre vermittelt einen guten Einblick, wie rasant sich die Genetik verändert hat.

Metzls Beschreibungen künftiger Kinderwunschkliniken wirken auf den ersten Blick wie Sciencefiction. Doch schon heute werden bei der In-vitro-Fertilisation, also der künstlichen Befruchtung, täglich Analysemethoden und Auswahlkriterien angewendet, um schwere Erkrankungen des Embryos zu vermeiden. Künftig, meint der Autor, würden Embryonen auch nach gewünschten Merkmalen etwa hinsichtlich der Leistungsfähig-



keit ausgewählt. Metzl zeigt hier auf, wie viele Faktoren etwa eine Eigenschaft wie Intelligenz bestimmen. Dabei beleuchtet er das komplexe Zusammenspiel von Genen und Umwelteinflüssen anhand bildhafter Analogien, ebenso wie die Entstehung schwerer monogenetischer Erkrankungen, die auf eine einzelne Mutation zurückgehen.

Das Buch führt vor Augen, welche Konflikte es mit sich bringt, Kinder nach spezifischen Eigenschaften auszuwählen. Doch nicht nur die Selektion von Embryonen, sondern auch aktive Veränderungen von deren Genom werden laut dem Autor künftig alltäglich sein. Er zeigt das am Beispiel der mitochondrialen DNA (mtDNA): Wenn diese mutiert ist, kann es zu schweren, oft tödlichen Erkrankungen kommen. Da die mtDNA immer mütterlicherseits vererbt wird, lassen sich solche Erkrankungen verhindern, indem man die Mitochondrien einer Eizelle durch intakte von

einer anderen Spenderin austauscht. Die Kinder, die aus solchen modifizierten Eizellen hervorgehen, haben zwei biologische Mütter – und zusammen mit dem Vater somit drei Eltern. In einigen Ländern sind solche Kinder bereits auf die Welt gekommen. Da sie die mtDNA an ihre eigenen Nachkommen weitergeben, stellt dieses Verfahren auch einen Eingriff in die DNA künftiger Generationen dar.

Metzl vergleicht die momentane genetische Revolution mit der Entwicklung der Atomkraft: Beide hätten das Potenzial, Leben enorm zu verbessern oder extremen Schaden anzurichten. Genau wie für Atomwaffenabkommen werde es auch bei der Gentechnik internationale Übereinkommen geben müssen, meint er. Allerdings zeige die Klimakrise, wie steinig der Weg hin zu einem gemeinsamen Konsens sei. Der permanente technologische Fortschritt erfordere zudem ein sehr flexibles Regelwerk. Manchen Randaspekten gibt der Autor zu viel Raum. So widmet er ein ganzes Kapitel dem Thema gesundes Altern. Auch springt er manchmal unvermittelt von Thema zu Thema – etwa von gentechnisch veränderten Pflanzen zu Abtreibungsfragen.

Unterm Strich ist »Der designte Mensch« dennoch ein Buch für alle, die sich näher mit der humangenetischen Revolution auseinandersetzen möchten. Im Sinn einer konstruktiven Diskussion stellt Metzl verschiedene Anschauungen und Meinungen vor.

Die Rezensentin Victoria Lunz ist Molekularbiologin und Wissenschaftsjournalistin in Linz.

## DOMESTIKATION AUF DEN HUND GEKOMMEN

**Vom Wolf zum treuen Begleiter des Menschen: die Rekonstruktion einer erstaunlichen Veränderung.**

► Warum haben Menschen und Hunde eine so intensive, fast familiäre Beziehung zueinander aufgebaut? Warum gilt der Hund als »bester Freund des Menschen«, obwohl er vom Wolf, einem gefürchteten Raub-

tier, abstammt? Diesen Fragen will Bryan Sykes in seinem Buch nachgehen und beschreibt, welche wissenschaftlichen Methoden sich für die Nachforschung eignen.

An den Anfang stellt der Autor die fiktive Geschichte einer Wölfin und ihrer Erfahrungen mit Steinzeitmenschen. Darin verpackt er die Hypothese, das Jahrtausende währende Zusammenleben von Menschen und Hunden habe sich aus einer Zweckgemeinschaft von Menschen und Wölfen für ein erfolgreiches Jagen entwickelt. Sykes, der zugleich Humangenetiker ist, sucht den Beweis dafür, dass Hunde tatsächlich von Wölfen abstammen. Und er fahndet danach, ob sich die enger werdende Mensch-Hund-Bindung im Erbgut der Tiere widerspiegelt. Dabei spannt er den Bogen vom Auftauchen der ersten Hunde im Jungpaläolithikum über ihre Domestikation bis zur modernen Züchtung von Rassen. Wissenschaftliche Erläuterungen machen den Schwerpunkt des Buchs aus. Erzählende Passagen sowie Interviews mit Tierforschern und zahlreichen Hundebesitzern gesellen sich hinzu.

Nach einem Einschub zu Darwins Evolutionstheorie führt Sykes seine Leser in molekulare Grundlagen ein. Schnell wird es anspruchsvoll, etwa wenn es um die Erforschung des molekularen Hundestammbaums mit immer diffizileren genetischen Techniken geht. Eine dieser technischen Entwicklungen betrifft die Analyse mitochondrialer DNA, die beispielsweise den sicheren Beweis für die Abstammung des Hunds vom Wolf lieferte. Weiterhin erläutert er unter anderem das Prinzip der Sättigungskartierung, die viele neue Erkenntnisse zur Vererbung ermöglicht habe. Ebenso stellt er mit dem so genannten Next Generation Sequencing und der SNP-Technik zwei Methoden vor, um einzelne Gene beziehungsweise Moleküle eindeutig zu identifizieren oder ihren Aufbau zu entschlüsseln.

Überraschenderweise, schreibt der Autor, lassen schon früheste Höhlenmalereien auf unterschiedli-



che Hundetypen schließen, etwa solche zur Jagd oder zur Bewachung. Auch präsentiere der Anubisschrein aus einem altägyptischen Grabmal als Symbol des Gottes die geschnitzte Figur eines Schakals, die aber eher einem Windhund ähnele.

Mit der Gründung des berühmten Kennel Club in England, so Sykes, habe die gezielte Züchtung auf bestimmte äußere Merkmale begonnen. Bereits 1859 habe die erste Rassehundeausstellung stattgefunden. In

diesem Zusammenhang erfahren die Leser, dass unterschiedliche Rassen oft durch Inzucht entstehen, was nicht selten zu gesundheitlichen Schwächen und körperlichen Schäden führt. Der Autor führt mehrere Beispiele hierzu an, verdeutlicht daran die Bedeutung von Mutationen und stellt Methoden zur Auffindung von Einzelgenen vor. Dalmatiner etwa leiden infolge eines Gendefekts häufig unter Gicht. Weil das betroffene Gen zugleich Erbinformationen enthält, die für die charakteristische Fellfärbung wichtig sind, selektieren Züchter den Defekt aber nicht aus.

Was die trotz der wissenschaftlichen Fortschritte noch weitgehend ungeklärte Frage betrifft, inwiefern bestimmte Verhaltensweisen auf genetische Ursachen zurückgehen, kann Sykes zumindest eine interessante Tatsache nennen: Das für den Menschen bedeutungsvolle »Bindungshormon« Oxytozin spielt auch in der Hundephysiologie eine Rolle.

Es führen quasi zwei mit einander verflochtene, rote Fäden durch das Buch: zum einen die Geschichte des Zusammenlebens von Menschen und Hunden und zum anderen die Entwicklung genetischer Untersuchungsmethoden, die diese Geschichte aufklären helfen. Indem er verschiedene Schreibstile miteinander kombiniert, versucht Sykes, den wissenschaftlich mitunter recht komplexen Stoff aufzulockern. Obwohl er die anspruchsvollen Methoden möglichst verständlich darstellen will, gelingt ihm das nicht immer, und er verliert sich zu sehr in inhaltlichen Abstechern. Auch hätte das Buch sicher von mehr Bildern profitiert, um die große Vielfalt der Hunderassen stärker zu veranschaulichen. Insgesamt regt die Lektüre aber durchaus an und vermittelt viel interessantes Wissen.

Die Rezensentin Bettina Pabel ist promovierte Lebensmittelchemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Aschaffenburg.



## Erweitern Sie Ihren Horizont. Und zwar ins Unendliche.

In **Sterne und Weltraum** erfahren Sie monatlich alles über Astronomie & Weltraumforschung!

### Jetzt im Miniabo testen!

Drei aktuelle Ausgaben von **Sterne und Weltraum** für nur € 17,40 statt € 26,70 im Einzelkauf  
Telefon: 06221 9126-743  
E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

[www.sterne-und-weltraum.de/miniabo](http://www.sterne-und-weltraum.de/miniabo)

## GESELLSCHAFT WAS TUN BEI AUSSER- IRDISCHEM BESUCH?

**Den Fall der Fälle könnte möglicherweise die Exosozio­logie vorbereiten helfen.**

► »Je näher das Objekt der Erde kommt, desto deutlicher wird, dass es künstlich sein muss. (...) Zwischen ihm und dem (...) jeder menschlichen Kontrolle entzogenen Radioteleskop nahe Tokio kommt es zu einem exakt 57 Minuten dauernden Austausch gigantischer Datenmengen. Am Weihnachtsabend 2023 erscheint auf allen ans Internet angeschlossenen Monitoren weltweit (...) die Botschaft »Jetzt wache ich über euch.« Dieses bedrohliche Szenario eines Erstkontakts zwischen Menschheit und außerirdischer Intelligenz schildern die Politologen, Soziologen und Kulturwissenschaftler Michael Schetsche und Andreas Anton in ihrem Buch »Sie sind da«. Wäre es angesichts einer solchen potenziellen Bedrohung nicht gut, schon vorher über eine derartige Begegnung und ihre Konsequenzen nachzudenken? Genau das ist das Ziel der Autoren, die damit auch gleichzeitig ihre Forschungsdisziplin einführen wollen: die Exosozio­logie.

Nach einem kurzen Abriss der Astronomiegeschichte beschreiben die Autoren, was Sciencefiction zu diesem Thema häufig ausmacht: Oft sind die Aliens hier nichts anderes als Spiegel unserer Ängste. Diese anthropozentrische Sicht kritisieren Anton und Schetsche als viel zu eng und stellen im zweiten Kapitel ihren Ansatz einer Exosozio­logie vor, die sich den Fragen um außerirdische Intelligenz möglichst vorurteilsfrei nähern will. Das dritte Kapitel erklärt ziemlich langatmig die berühmte Drake-Formel, um am Ende doch wieder nur festzustellen, dass die einzelnen Faktoren darin viel zu ungenau bekannt sind, um eine sinnvolle Aussage darüber treffen zu können, wie viele intelligente Spezies es im All gibt. Das vierte Kapitel beschreibt SETI, die berühmte Initiative, um nach Radiosignalen außerirdischer Zivilisationen zu suchen, und aktive Kommunikati-

onsversuche der Menschheit. Beides ist bislang erfolglos geblieben. Im fünften Kapitel spielen die Autoren exemplarisch drei Szenarien des Erstkontakts durch, von denen das schlimmste eingangs zitiert wurde. Diese erlauben uns, zu überlegen, wie wir uns vorbereiten können auf eine erste Begegnung mit Außerirdischen und wie sich außerirdische Zivilisationen womöglich beschreiben lassen.

Ist es sinnvoll, eine Forschungsdisziplin namens Exosozio­logie zu begründen? Anton und Schetsche argumentieren: Auch wenn wir nicht wissen, wie wahrscheinlich ein Kontakt ist, wären dessen Folgen extrem weitreichend. Darum sei es wichtig, sich darauf vorzubereiten. Wer darf etwa bestimmen, was die Menschheit auf ein außerirdisches Radiosignal antworten soll? Wissenschaftler, Politiker oder Sprecher einer darauf spezialisierten Initiative? Wie stellt man sicher, dass sich in so einem Fall alle Beteiligten an



die Absprachen halten? Wann und wie sollte die Weltöffentlichkeit von einem Kontakt oder Besuch erfahren? Es gibt mehr als genug offene Fragen.

Die Autoren gehen erstaunlicherweise nicht auf den Fall ein, dass wir eine außerirdische Zivilisation anhand ihres normalen Radioverkehrs entdecken. Es geht immer nur um gezielte Kontaktaufnahme, nicht aber darum, dass Aliens sich einfach ungewollt verraten könnten – genau wie es die Menschheit tut, seit sie Radiowellen als Kommunikationsmedium nutzt. Natürlich müsste man in so einem Fall nicht reagieren, aber auch dann hätte die Erkenntnis, dass wir nicht allein sind, enorme Folgen für unser Selbstverständnis.

Zudem sind Anton und Schetsche sehr pessimistisch, was die Chancen angeht, außerirdische Signale zu entschlüsseln. Sie führen Ergebnisse der Ethnomathematik an, wonach nicht alle Kulturen die gleiche Mathematik entwickelt haben. Das Argument greift aber zu kurz, denn nicht jede Art von Mathematik beschreibt die beobachtbaren physikalischen Phänomene korrekt. Eine in dieser Hinsicht korrekte Mathematik wäre aber nötig, um interstellare kommunizieren zu können. Und wieso ein außerirdisches Signal dermaßen kompliziert verschlüsselt sein sollte, dass es für uns nicht lesbar wäre, erschließt sich nicht – zumal wenn es bewusst zur Kontaktaufnahme gesendet würde.

Bei ihren Kontaktszenarien lassen die Autoren folgende Überlegung vermissen: Sollte die Erde besucht werden, würden die Außerirdischen wohl wissen, dass wir nicht darauf vorbereitet sind. Sie würden die Reaktionen auf ihr Erscheinen mitbedenken und wären entsprechend vorsichtig. Zumal sie Erfahrungen damit durchaus haben könnten, denn es wäre alles andere als selbstverständlich, dass auch wir für sie der Erstkontakt sind. Wenn es mehr als eine belebte Welt in der Milchstraße gibt, dann wohl nicht zufällig genau zwei, sondern deutlich mehr.

Dankenswerterweise verzichten Anton und Schetsche darauf, die abstrusen Ideen Erich von Dänikens zu erwähnen. Jedoch hätten sie einen Abschnitt über 'Oumuamua aufnehmen können, den ersten interstellaren Asteroiden, der im Herbst 2017 auftauchte und derart ungewöhnliche Eigenschaften hat, dass Forscher öffentlich überlegten, ob er ein außerirdisches Raumschiff sei. Zudem bleibt das Szenario, das Carl Sagan (1934–1996) in seinem Roman »Kontakt« beschrieb, leider unerwähnt. Vielleicht, weil der Roman stark auf SETI basiert und die Autoren dem sehr kritisch gegenüberstehen. Das mag zunächst erstaunen, wird aber verständlich, bedenkt man, dass viele SETI-Beteiligten nach Außerirdischen suchen, ohne über die Notwendigkeit einer Exosozio­logie auch nur nachzudenken.

Der Rezensent Stefan Gillessen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik.

# Wissen ist Kopfsache

Wie wir denken, fühlen, handeln:  
Psychologen und Hirnforscher erklären in  
**Gehirn&Geist**, was in unseren Köpfen vorgeht.  
Lernen Sie sich von ganz neuen Seiten kennen!



Jetzt 3 Ausgaben von **Gehirn&Geist** testen!  
Für nur € 15,60 im Miniabo.

[www.gehirn-und-geist.de/miniabo](http://www.gehirn-und-geist.de/miniabo)

## GELUNGENE VIELFALT

Im Februarheft ging es unter anderem um die Ursprünge des Bewusstseins, Reptilien des Erdmittelalters, »Gene Drives«, Pflanzenstrukturen, Wolkenbildung und das junge Universum.

**Malte Schubert, per E-Mail:** Ein großes Kompliment für die Februarausgabe. Eine äußerst gelungene Themenvielfalt mit sehr interessanten Artikeln. Besten Dank!

## DIFFERENZIERUNG ZWISCHEN NATURGESETZEN

Die fundamentalen Regeln der Physik gelten nur unter idealisierten Bedingungen. Der Philosoph Alexander Mäder fragte, was das für unser praktisches Verständnis bedeutet. (»Wie universell sind Naturgesetze?«, »Spektrum« Februar 2020, S. 82)

**Raimund Sommer, Maulburg:** Der Artikel befasst sich zu Recht mit der wichtigen Frage, unter welchen Voraussetzungen Naturgesetze gelten. Leider unterlaufen dabei Kategorienfehler, wie man sie gerade in diesem Zusammenhang immer wieder antrifft. Eklatante Beispiele dafür finden sich auch in Stephen Hawkings Buch »Kurze Antworten auf große Fragen«, in dem er meint: »Folglich kennt, wer die Naturgesetze kennt, die Gedanken Gottes.«

Die entscheidende begriffliche Differenzierung muss getroffen werden einerseits zwischen den wissenschaftlichen Naturgesetzen in Form von meist mathematisch formulierten Modellvorstellungen beziehungsweise Theorien und andererseits den eigentlichen Naturgesetzen, denen Energie und Materie seit dem Anfang unseres Universums gehorchen.

Erstere gründen auf dem menschlichen Erkenntnisvermögen. Eine hervorragende Grundlage dazu hat Arthur Schopenhauer bereits 1813 in seiner Dissertation »Über die vierfache Wurzel des Satzes vom zureichenden Grunde« gelegt. Darin unterscheidet er vier Klassen von Objekten: erstens die anschaulichen Vorstellungen, zweitens die abstrakten Vorstellungen oder Begriffe, drittens die Formen der Anschauung (Raum und Zeit) und schließlich viertens das unmittelbare Objekt des inneren Sinnes. Die wissenschaftlichen Naturgesetze sind Elemente der ersten drei. Sie sind zeitlich veränderlich, denn neue Erkenntnisse erfordern Anpassungen.

Die eigentlichen Naturgesetze, denen gemäß sich jedes noch so kleine Teilchen und jedes Energiequant verhalten, sind dem Menschen grundsätzlich unzugänglich. In dem Zusammenhang soll der dänische Physiker Niels Bohr gesagt haben: »Es gibt keine Quantenwelt. Es gibt nur eine abstrakte, quantenphysikalische Beschreibung. Es ist falsch anzunehmen, die Aufgabe der Physik bestünde darin, das Wesen der Natur zu ergründen. Die Physik hat es mit dem zu tun, was wir über die Natur sagen können.«



Da der Artikel nicht zwischen den wissenschaftlichen Naturgesetzen und den eigentlichen unterscheidet, wird der Eindruck erweckt, das menschliche Erkenntnisvermögen könne transzendent denken, was ein Widerspruch in sich ist. Die zeitlich veränderlichen Modellvorstellungen stellen mitnichten »Gottes Regelwerk« dar. Sie sind komplexe Konstrukte (wenn auch bewundernswerte Leistungen großer Denker und Forscher). Sie müssen logisch klar differenziert werden vom eigentlichen, zeitlich unveränderlichen Wesen der Natur.

## TÜCKEN DER STATISTIK

Wer die Prognose seiner Restlebensdauer regelmäßig der Tatsache anpasst, dass er immer noch nicht gestorben ist, überschätzt am Ende seine Lebenserwartung. (»Der Tod kommt stets zu früh«, Mathematische Unterhaltungen, »Spektrum« Januar 2020, S. 82)

**Thomas Scharnagl, Tiefenbach:** Im Artikel wurde das anschauliche Bild einer konstanten Sterberate verwendet: Man greift jedes Jahr in die Kiste mit 83 weißen und einer schwarzen Kugel, und wenn man die schwarze Kugel erwischt, stirbt man. Daraus wurde geschlossen, dass die zu diesem Zeitpunkt erwartete Restlebensdauer 84 Jahre beträgt. Das ist so nicht richtig.

Nehmen wir zur Vereinfachung einen Würfel und berechnen, nach wie vielen Würfeln wir einen Sechser erwarten können (beziehungsweise müssen, wenn das das Todesurteil ist). Im Mittel würfeln wir zwar alle sechs Würfel einmal die Sechs. Wenn wir aber zu würfeln anfangen, sind die Wahrscheinlichkeiten, genau im ersten Wurf eine Sechs zu würfeln  $1/6$ , genau im zweiten Wurf  $5/36$ , allgemein  $5^{(n-1)}/6^n$ .

Wenn man die Wahrscheinlichkeiten aufsummiert, konvergiert die Summe bei unendlich vielen Würfeln natürlich zu 100 Prozent. Aber schon nach dem vierten Wurf hat man mit einer Wahrscheinlichkeit von 51,8 Prozent eine Sechs gewürfelt. Entsprechendes gilt auch für die Ziehung mit den 83 weißen und einer schwarzen Kugel. Da ergibt die Rechnung, dass man schon nach 58 Jahren mit 50,1 Prozent Wahrscheinlichkeit die schwarze Kugel erwischt. Schlussfolgerung: Die Lebenserwartung beträgt hier 58, nicht 84 Jahre.

#### Antwort des Autors Christoph Pöppe:

Sie haben leider eine falsche Definition vom Erwartungswert verwendet. Es geht nicht darum, wann der Mensch mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit tot ist, sondern wie lange er noch »im Durchschnitt« zu leben hat. Das heißt, man stellt sich eine große Anzahl von Menschen vor, die alle demselben Zufallsprozess unterworfen sind wie der Einzelne, um den es geht, und berechnet deren durchschnittliche Lebensdauer. Für Ihr Beispiel (man stirbt genau dann, wenn der Würfel die Sechs zeigt) berechnet sich das so: Ein Sechstel unseres gedachten Kollektivs wird ein Jahr alt. Von den restlichen fünf Sechsteln stirbt ein Sechstel mit zwei Jahren, von den restlichen  $(5/6)^2$  wieder ein Sechstel mit drei Jahren, und so weiter. Also ist die durchschnittliche Überlebenszeit des Kollektivs und damit die erwartete Lebenszeit unserer Hauptperson

$$= (1/6) \cdot 1 + (5/6) \cdot (1/6) \cdot 2 + (5/6)^2 \cdot (1/6) \cdot 3 + \dots$$

Die unendliche Summe kann man ausrechnen; das Ergebnis ist sechs Jahre, wie es sich gehört.

Wenn der Mensch unglaubliches Glück hat, kann er sehr alt werden; das treibt den Erwartungswert hoch. Aber auf die Dauer wird es arg einsam um ihn; denn wie Sie richtig berechnet haben, ist nach vier Jahren (ungefähr) die Hälfte seiner Altersgenossen schon unter der Erde.

## KOHLNSTOFF WIRD ZU SCHNELL FREI

**Der Geochemiker Friedhelm von Blanckenburg** beschrieb die Balance aus natürlichen Emissionen von  $\text{CO}_2$  und dessen Verbrauch durch Gesteinsverwitterung – und wie Isotopenmessungen verraten, wieso sich die Erde trotzdem in den letzten 15 Millionen Jahren bis zur Eiszeit abkühlte. (»Der Thermostat der Erde«, »Spektrum« März 2020, S. 48)

**Christian Hubert, Leipzig:** Ich fand den Artikel sehr informativ. Insbesondere wird gezeigt, dass die  $\text{CO}_2$ -Absorption des Festlands seit Millionen Jahren steigt, obwohl andere Parameter konstant bleiben. Zu Recht wird in einem Infokasten auf den  $\text{CO}_2$ -Verbrauch durch Pflanzen hingewiesen. Dort heißt es ebenfalls richtig, dass dies keinen Nettoeffekt hat, solange keine Kohle (wie im Devon) gebildet wird. Nun scheint mir aber genau dies mit der tertiären Braunkohlebildung geschehen zu sein. Dann ließe sich daraus sogar die

## 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.

Forderung ableiten, alle Braunkohle (nicht Steinkohle) zu verbrennen, um die paradiesischen Zustände zu Beginn des Tertiärs wiederherzustellen. Was habe ich übersehen?

#### Antwort des Autors Friedhelm von Blanckenburg:

Sie nennen genau das Problem der fossilen Brennstoffe. Sie entstanden über viele Dutzende von Millionen Jahren, und die damaligen Ökosysteme hatten alle Zeit, sich an die wechselnden Klimabedingungen anzupassen. Heute setzt der Mensch den über extrem lange Zeiträume eingelagerten Kohlenstoff in nur wenigen Jahrzehnten frei (wobei es gleichgültig ist, ob das dabei emittierte  $\text{CO}_2$  aus Braunkohle, Steinkohle, Erdöl oder Erdgas stammt). Die Ökosysteme der Erde haben angesichts der Geschwindigkeit und das daraus folgenden Temperaturanstiegs nicht die Zeit, auf die Änderungen zu reagieren. Erst Recht nicht der Mensch, denn mit sieben Milliarden von uns gibt es dafür weder den Platz noch die globalen Ressourcen.

**Selbst die höchsten Gipfel werden innerhalb von Jahrmillionen durch Erosion abgetragen.**

**Das bindet Kohlendioxid aus der Atmosphäre.**



## Die Wiedergeburt

**Alle Sünden seien dir vergeben.**

Eine Kurzgeschichte von Eden Fenn

Das Register meiner Verfehlungen ist in jede Zelle meines Körpers eingeschrieben.

»Bevor wir fortfahren können«, sagt Schwester Ruth, »muss ich sicherstellen, dass du dich mit Leib und Seele hingibst. Du wirst diese Gelegenheit nur ein einziges Mal erhalten.«

Ich nicke und hoffe, dass die Geste unterwürfig wirkt, dass sie keinen inneren Widerstand verrät. Ich hätte mich nicht an diesem Ort gemeldet, wenn ich mir meiner Sache nicht sicher wäre.

Zwei Fotografien liegen auf dem Stahltisch, der uns trennt. Schwester Ruth deutet auf das Bild zu ihrer Rechten.

### »Anne Whitman hat niemals verstanden, welchen Schaden sie anrichtete«

»Das ist Anne Whitman. Sie hat niemals verstanden, welchen Schaden sie anrichtete, indem sie nach ihren eigenen Regeln lebte. Sie sah nicht ein, wozu der Glaube gut sein soll. Jahrelang kam sie damit gut zurecht. Doch da sie sich nur von ihrer persönlichen moralischen Richtschnur leiten ließ, ging sie mehr und mehr in die Irre. So wurde aus ihr eine Drogenhändlerin, der nun Gefängnis droht, ohne Chance auf dem Arbeitsmarkt, ohne Zukunft. Eine Frau, die am Ende ist.«

Ich blicke von meinen gefalteten Händen auf und betrachte das Bild. Ein grobkörniges Verbrecherfoto meines Gesichts starrt mich an.

Schwester Ruth fixiert mich mit ihrem kalten Blick, bis ich ihr in die Augen schaue. Dann deutet sie auf das andere Foto. »Das ist Anne White.«

Die Frau auf diesem Bild könnte meine entfernte Verwandte sein oder eine nach einer mündlichen Beschreibung meines Aussehens angefertigte Zeichnung. Sie trägt die gleiche Kopfbedeckung wie Schwester Ruth – nach Art eines Nonnenschleiers, aber babyblau.

Meine Mutter erzog mich katholisch. Als junge Frau hatte sie sich herumgetrieben und eine Menge Fehler begangen, unter anderem mich. Als es höchste Zeit wurde, dass sie ihr Leben in den Griff bekam, nahm sie sich die

Geschichte des verlorenen Sohns zum Vorbild und kehrte zu alledem zurück, wovor sie geflohen war: Eltern, Glaube, Kirche. Wäre ich bis heute mit ihr in Kontakt geblieben, hätte sie mich wahrscheinlich erneut verstoßen, weil ich mich diesem »Sektenkult« hier angeschlossen habe. Aber die Neue Kirche bietet eine besonders praktische Form der Absolution an.

»Diese andere Anne ist eine Novizin der Neuen Kirche«, fährt Schwester Ruth fort. »Sie hat ihr selbstsüchtiges Verhalten abgelegt und ihr altes Leben hinter sich gelassen. Sie ist jeden Tag bestrebt, für ihre Sünden zu büßen. Und in Anerkennung dieser Buße will die Neue Kirche ihr einen neuen Anfang ermöglichen. Ihre Vergangenheit soll ausgelöscht sein.«

Mein »selbstsüchtiges Verhalten« begann mit einem spontanen Posting, das ich durch die sozialen Medien schickte. Ein der Kirche nahestehender Politiker hatte ein paar widerliche Bemerkungen über einen Frauentreffpunkt gemacht, also textete ich etwas Abfälliges über diesen Politiker. Ich nahm an, er würde mich blocken und damit wäre die ganze Sache erledigt.

Es war ein nachlässiger Akt des Aufbegehrens. So etwas taten die Leute halt, ohne lange darüber nachzudenken – aber die Regeln änderten sich schneller, als ich ahnte. Als ich am nächsten Tag zur Kaffeestube ging, um meine Schicht anzutreten, wurde mir gekündigt. Mein Ex-Chef zeigte mir auf dem Display seines Tablets ein Datenprofil, das meinen beleidigenden Kommentar zusammen mit meiner Sozialversicherungsnummer anzeigte sowie die digitalisierte Blutprobe, die im Rahmen der Personenüberprüfung bei meiner Anstellung genommen worden war.

Damit nicht genug: Das soziale Netzwerk hatte meine gesamte private Korrespondenz der Bundespolizei übergeben. Eine kommentierte Auswahl von Online-Chats mit Bekannten und mit meiner Freundin Kat stand nun zusammen mit meinem Datenprofil im Netz; das reichte von sehr offeneren Kommentaren bezüglich laufender Ereignisse bis zu intimen Fotos, die ich Kat gepostet hatte, als sie im Ausland studierte. Das alles ergab das Porträt einer durch und durch verkommenen Person. Von jenem Tag an konnte sich jeder denkbare Arbeitgeber von mir ein hinreichend abstoßendes Bild machen.

Ich fand danach noch ein paar Gelegenheitsjobs in Hinterzimmern, in den dreckigsten Küchen der Stadt, mit den widerlichsten Chefs. Nirgends konnte ich das lange aushalten. Bald gehörte auch der häufige Jobwechsel zum

Makel meines Lebenslaufs. In den vergangenen 18 Monaten musste ich mich ohne feste Anstellung irgendwie durchschlagen, auf jede erdenkliche Weise. Und jetzt hat mich all das eingeholt.

»Also«, fragt Schwester Ruth, »welche dieser beiden Frauen möchtest du sein?«

Ich nicke dem Gesicht mit einer Zukunft zu, der Person ohne Vergangenheit.

»Ausgezeichnet.« Ruth lächelt und wendet sich an den Justizvollzugsbeamten. »Sie können sie in meine Obhut entlassen.«

Ich unterzeichne die Dokumente, während Ruth mich zu der Taufe fährt. Ich willige ein, niemals wieder zu irgendjemandem aus meinem alten Leben Kontakt aufzunehmen. Aber es gibt ohnehin niemanden, den ich kontaktieren könnte: Mit Kat habe ich gebrochen, bevor ich sie mit mir hätte hinunterziehen können. Doch dafür habe ich in den letzten paar Monaten neue Freunde gewonnen, und die werden Möglichkeiten finden, mich zu erreichen. Es gibt immer noch nichtöffentliche Kanäle.

Im Wiedergeburtzentrum der Neuen Kirche lege ich mich auf einen babyblauen Tisch, der an Seilen über dem großen Taufbecken pendelt. Der Priester liest die Worte des Ritus, während der Anästhesist mir meine Atemmaske und den intravenösen Zugang anlegt.

Das Letzte, was ich erblicke, ist das Lächeln von Schwester Ruth, während ich in die zähe, milchige Flüssigkeit sinke. »Wir werden uns bald wiedersehen, Anne.«

Im Taufteich werden meine Zellen neu aufgebaut, meine DNA wird umgeschrieben, so dass ich niemals mehr als Anne Whitman identifiziert werden kann. Nur so lassen sich meine Daten restlos ausradieren. Nach dem Auftauchen und Erwachen werde ich mein eigenes Gesicht im Spiegel nicht wiedererkennen. Aber ich werde neu geboren sein, neu erschaffen, ohne die Last der Vergangenheit. Blitzsauber, alle Sünden abgewaschen.

Als Gegenleistung schulde ich der Neuen Kirche sieben Jahre Frondienst. Sieben Jahre, um sie von innen zu studieren, ihre Geheimnisse zu erfahren, um alles, was ich finde, mitzuteilen.

Diesmal werde ich eine schlauere Sünderin sein. Ich werde die Regeln dieser neuen Welt lernen; ich werde meinen Widerspruch geheim halten. Ich werde die Orte entdecken, auf die das allsehende Auge nicht blickt. Sie werden mich nie wieder erwischen. ◀

## nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
[nature.com/futures](http://nature.com/futures), 04. März 2020

### DIE AUTORIN

**Eden Fenn** entwickelt Software und begeistert sich für In-vitro-Fleisch. Sie schreibt Sciencefiction-Romane und lebt mit ihrer Frau in Baltimore.

## Spektrum der Wissenschaft

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

**Redaktionsleiter:** Dr. Hartwig Hanser

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

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

**Layout:** Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heintelmann, 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

**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Thorwald Ewe, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, 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. 41 vom 1.1.2020.

**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: © 2020 (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: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President Magazines: Stephen Pincock



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



# VORSCHAU



ILLUSTRATION: MARK ROSS/STUDIO; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## EINE NEUE ORDNUNG DER ZEIT

In konventionellen Kristallen sortieren sich die kleinsten Bestandteile zu räumlich wiederkehrenden Mustern. Vor wenigen Jahren haben theoretische Überlegungen eine hypothetische, bisher unbekannte Art der Regelmäßigkeit enthüllt: Zeitkristalle. Das Konzept erweitert die bisherigen Vorstellungen von Symmetrie in der Natur – zunächst scheinbar ohne Bezug zur physikalischen Realität. Doch inzwischen entdecken Forscher immer mehr exotische Materialien, in denen das Phänomen tatsächlich vorkommt.

FOTO: MATT MAGER



## GIFTIGE MISCHUNG

Waldbrände setzen eine Menge Stoffe frei, die als Rauch in die Atmosphäre gelangen. Welche Substanzen dabei genau entstehen und wie sie wirken, wollen Wissenschaftler mit hochempfindlichen Instrumenten und fliegenden Laboratorien herausfinden. Auf diese Weise haben sie bereits verblüffende Entdeckungen gemacht.



FREDER/GETTY IMAGES/ISTOCK

## LEBEN AUF EINEM GALAKTISCHEN ARCHIPEL

Astrophysiker diskutieren eine neue Erklärung dafür, dass wir bisher keine außerirdischen Zivilisationen aufgespürt haben: Womöglich befindet sich unser Sonnensystem gerade in einem Gebiet, das nur wenig zugänglich ist.



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

## AUF DER JAGD NACH NEUEN MEDIKAMENTEN

Seit Jahren steckt die Arzneimittelforschung in der Krise: Es wird immer schwieriger, neue, effektive Wirkstoffe zu finden. Viele Pharmakonzerne wollen deren Entwicklung mittels künstlicher Intelligenz beschleunigen. Aber können die selbstlernenden Algorithmen die Erwartungen erfüllen?

## 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)

# Verpassen Sie keine Ausgabe!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!



## ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,-), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



## KOMBIABO:

Für nur € 6,-/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



## Spektrum PLUS:

**Spektrum PLUS** bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserexkursionen und Redaktionsbesuche.

## Jetzt bestellen!

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

[www.spektrum.de/abo](http://www.spektrum.de/abo)

# DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



**Spektrum**  
der Wissenschaft  
**DIE WOCHE**

NR **12** 19.03.2020

- > Erste klinische Impfstoffstudie »in Rekordtempo gestartet«
- > Fragen und Antworten zu Covid-19
- > »Absolut essenziell, dass wir daraus lernen«

SONDERAUSGABE ZUR COVID-19-PANDEMIE

## Die Welt kämpft gegen ein neues Coronavirus

Das Coronavirus Sars-Cov-2 verändert das Leben weltweit. Hier finden Sie Antworten auf drängende Fragen, erfahren wie Forscher die Ausbreitung des Virus nachvollziehen und wie man in Quarantäne gut zurecht kommen kann.

**CORONAVIRUS-PANDEMIE**  
Was ist ein Covid-19-Mythos, was die Wahrheit?

**COVID-19**  
Die Frau, die Coronaviren jagt

**CORONAVIRUS**  
Der Stammbaum der Pandemie

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.

[www.spektrum.de/abonnieren](http://www.spektrum.de/abonnieren)

