

# Spektrum

der Wissenschaft

## Wie alt können wir werden?

Auf der Suche nach dem Jungbrunnen



**KOSMOS** Sieht er wirklich überall gleich aus?

**ALASKA** Giftige Algenblüten gefährden Ernährung

**PHOSPHOR** Rohstoffrecycling aus Abwasser

# Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**



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

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



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



Hier bestellen:

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

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



# EDITORIAL GEFÜHLTE LEBENSMITTE

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.de

► Als ich vor ein paar Jahren 50 wurde, meinte mein Vater beim Gratulationstelefonat, er selbst hätte diese Marke damals mehr oder weniger als Mitte des Lebens empfunden – obwohl jene rechnerisch ja bereits längst hinter einem liege, wenn man die allgemeine Lebenserwartung betrachte. So oder so empfand ich den runden Geburtstag doch als eine gewisse Zäsur. Seitdem drängt sich mir schon ab und zu der Gedanke auf, ich könnte langsam alt werden. Aber wann genau ist man eigentlich »alt«? Von der Anzahl an Lebensjahren hängt das sicher nur wenig ab; bekanntlich ist heute 50 das neue 40. Oder vielleicht sogar schon das neue 30, ich habe da den Überblick etwas verloren.

Auch wenn man solche lockeren Sprüche natürlich mit Vorsicht genießen muss, hat der medizinische Fortschritt durchaus dazu geführt, dass die Menschen weltweit durchschnittlich in besserer Gesundheit ein höheres Alter erreichen als zu früheren Zeiten. Ebenso nimmt die Zahl der 100-Jährigen – die also tatsächlich mit 50 erst maximal die Hälfte ihres Lebens hinter sich hatten – ständig zu. Heißt das womöglich, es gibt keine harte Obergrenze für ein maximal erreichbares Alter und die Lebenserwartung könnte prinzipiell ständig zunehmen? Hier sind sich die Fachleute uneins, wie der Artikel ab S. 12 darlegt. Vieles spricht aktuell gegen die Möglichkeit, wesentlich älter als 120 werden zu können. Aber künftige medizinische Fortschritte könnten dafür sorgen, dass hier das letzte Wort noch nicht gesprochen ist.

Der zweite Artikel unseres Titelthemas, das gleichzeitig den Startschuss für unsere neue dreiteilige Serie zu verschiedenen Aspekten rund ums Altern bildet, geht ab S. 18 der Frage nach, inwieweit die Umwelt und der individuelle Lebensstil beeinflussen, wie schnell der Organismus im Alter abbaut. Das ist derzeit aktueller denn je, denn gerade die zahlreichen negativen Auswirkungen der Covid-19-Pandemie scheinen den Alterungsvorgang zu beschleunigen – sei es der vermehrte Stress, soziale Isolation oder die Infektion selbst sowie die dadurch ausgelöste Entzündungsreaktion. Die gute Nachricht: Man kann dem durch gesunde Verhaltensweisen entgegenwirken, etwa durch tägliche Bewegung sowie Vermeiden von Übergewicht, Rauchen und zu viel Alkohol.

Solche Regeln versuchen auch mein Vater und ich zu beherzigen. Inzwischen hat er bei bester Gesundheit seinen 90. Geburtstag gefeiert – vielleicht klappt das mit 50 als echter Mitte des Lebens ja doch noch für ihn. Und mit viel Glück und etwas medizinischem Fortschritt dann für mich ebenfalls?

Hoffnungsvoll grüßt



## NEU AM KIOSK!

Im **Spektrum SPEZIAL** Biologie – Medizin – Hirnforschung 2.22 dreht sich alles um die Themen Ernährung und Essen – vom Mythos Paläodiät bis zum Fleischersatz aus Pflanzenproteinen.

## IN DIESER AUSGABE



### MARTIN BERTAU UND PETER FRÖHLICH

forschen an Wegen, immer knapper werdende Rohstoffe zu gewinnen und zu recyceln. Die beiden Chemiker haben ein Verfahren auf den Weg gebracht, um Phosphat aus dem Abwasser wiederzugewinnen. Warum das wichtig ist, beschreiben sie ab S. 44.



WILL KIRK

### EMILY RIEHL

Ab S. 76 erklärt die US-amerikanische Mathematikerin Emily Riehl, was es mit einem der abstraktesten Gebiete der Mathematik auf sich hat, der Kategorientheorie. Sie engagiert sich in der Wissenschaftskommunikation, betreut beispielsweise den Blog »n-Category Café« und ist im Vorstand der LGBT-Mathematik-Vereinigung »Spectra«.

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

24 FORSCHUNG AKTUELL

**Atomuhr mit Zeitdilatation**

Eine Atomwolke offenbart relativistische Effekte.

**Pendler zwischen den Welten**

Dennis Parnell Sullivan erhält den diesjährigen Abelpreis.

**Genauere Vorhersage**

Molekülberechnungen werden dank KI realistischer.

31 SPRINGERS EINWÜRFE

**... denn es fühlt wie du den Schmerz**

Welches Leid spüren Tiere?

64 SCHLICHTING!

**Unscheinbare Grenze im Fluss**

Ein Wellenkamm trennt Wasseroberflächen.

85 FREISTETTERS FORMELWELT

**Ordnung im Chaos**

Viele zufällige Zahlen folgen vorhersehbaren Mustern.

86 REZENSIONEN

93 IMPRESSUM

94 ZEITREISE

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

98 VORSCHAU

12 ALTERN **WIE LANGE KÖNNEN WIR LEBEN?**

Hat unsere Lebenserwartung eine Obergrenze? Fachleute streiten um eine der ältesten Fragen der Menschheit.

Von Michael Eisenstein

18 BIOMEDIZIN **WAS UNS ALTERN LÄSST**

Infektionskrankheiten, Einsamkeit und Stress wirken sich darauf aus, wie schnell der Organismus vergeist. Das hat Folgen für die Gesundheit.

Von Emily Sohn

32 ÖKOLOGIE **GEFAHR AUS DEM WASSER**

Vor Alaska kommt es immer öfter zu toxischen Algenblüten. Indigene Gemeinschaften dort bauen jetzt wissenschaftliche Netzwerke auf, um sich vor der Vergiftungsgefahr zu schützen.

Von Karen Pinchin

44 PHOSPHOR-RECYCLING **WERTVOLLES ABWASSER**

Um die Versorgung mit dem unabdingbaren Nährstoff Phosphor zu sichern, müssen wir das Element aus dem Abwasser zurückgewinnen.

Von Martin Bertau und Peter Fröhlich

52 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **POP-ART-LABOR**

Raffinierte Chemie machte die ersten Kopien möglich. Mit den Verfahren lassen sich eindrucksvolle farbige Kunstwerke erschaffen.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

58 ASTRONOMIE **RÜTTELN AM KOSMOLOGISCHEN PRINZIP**

Einzelne Beobachtungen scheinen der Grundannahme zu widersprechen, der Weltraum sei im Großen und Ganzen überall gleich beschaffen.

Von Charlie Wood

66 ZEITMESSUNG **STOPPUHR FÜR DIE QUANTENWELT**

Ein Experiment soll dabei helfen, unterschiedliche Vorhersagen dafür zu überprüfen, wie lange ein Teilchen für eine kurze Strecke benötigt.

Von Anil Ananthaswamy

72 KI **EIN CHIP NACH DEM VORBILD DES GEHIRNS**

Informatiker haben einen analogen Computerchip hergestellt, der ähnlich wie das Gehirn funktioniert – und extrem energieeffizient ist.

Von Allison Whitten

76 KATEGORIEN THEORIE **DIE MATHEMATIK DER MATHEMATIK**

Kommt man nicht weiter, hilft es, Abstand zu nehmen. So auch in der Mathematik: Die Vogelperspektive liefert neue Erkenntnisse.

Von Emily Riehl

12

TITELTHEMA  
WIE ALT  
KÖNNEN  
WIR WERDEN?



MICROSTOCKHUB / GETTY IMAGES / ISTOCK, BEARBEITUNG, SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



KILIJ VODAN

32

ALGENGIFTE  
GEFAHR AUS DEM WASSER



KENN BROWN, MONDOUHC STUDIOS

66

ZEITMESSUNG  
STOPPUHR FÜR DIE  
QUANTENWELT

UNIVERSITÄT HEIDELBERG, ERIC MÜLLER

72

KI  
GEHIRN ALS  
VORBILD



76

KATEGORIENTHEORIE  
DIE MATHEMATIK DER  
MATHEMATIK



ERIC PETERSEN ILLUSTRATION / SCIENTIFIC AMERICAN, OKTOBER 2021



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

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

# SPEKTROGRAMM

## FARN AUS DEM CHEMNITZER URWALD

► Wo heute Chemnitz liegt, erstreckte sich während des frühen Perm-Zeitalters ein üppiger Wald. Er wurde vor rund 291 Millionen Jahren von vulkanischem Auswurf verschüttet. Dabei brach die Krone eines Samenfarntes herunter, verschwand unter Ascheschichten und versteinerte später. 2010 bargen Paläobotaniker das Exemplar als ungewöhnlich gut erhaltenes Fossil.

Forscher um Ludwig Luthardt vom Berliner Museum für Naturkunde haben die versteinerte Pflanze nun untersucht und beschrieben. Demnach handelte es sich um ein Gewächs der Spezies *Medullosa stellata*. Zu Lebzeiten dürfte es ungefähr zehn Meter hoch

gewesen sein; der schlanke Stamm trug zahlreiche Farnwedel, jeder dreieinhalb Meter lang. Wie am frei präparierten Fossil zu erkennen, waren die Wedel mit gefiederten Blättern bestückt. Die Forscher vermuten, dass *M. stellata* unter dem Dach größerer Cordaitales wuchs, baumförmiger Samenpflanzen, die zu den Vorfahren der heutigen Nadelbäume gehörten.

*M. stellata* zählte zur Ordnung Medullosales. Deren Vertreter waren wahrscheinlich überwiegend an feuchte Standorte angepasst. Als gegen Ende des Perms das Klima trockener wurde, starb diese Pflanzengruppe aus.

*PeerJ* 10.7717/peerj.13051, 2022





LEWIS CLATHRAT / MUSEUM FÜR NATURKUNDE,  
BERLIN. FOTO: J. W. WILSON / SCIENCE AND  
BIOLOGICAL RESEARCH

## ASTRONOMIE DER FERNSTE BEKANNTE STERN

Der Name »Earendel« stammt aus dem Altenglischen und bedeutet so viel wie »Morgenstern« oder »aufgehendes Licht«. Ein Forscherteam um Brian Welch von der Johns Hopkins University (USA) hat nun einen Stern entdeckt, der sein Licht bereits 900 Millionen Jahre nach dem Urknall ins All aussendete – und ihm diesen Namen gegeben. Earendel ist der am weitesten entfernte sichtbare Stern, den wir kennen.

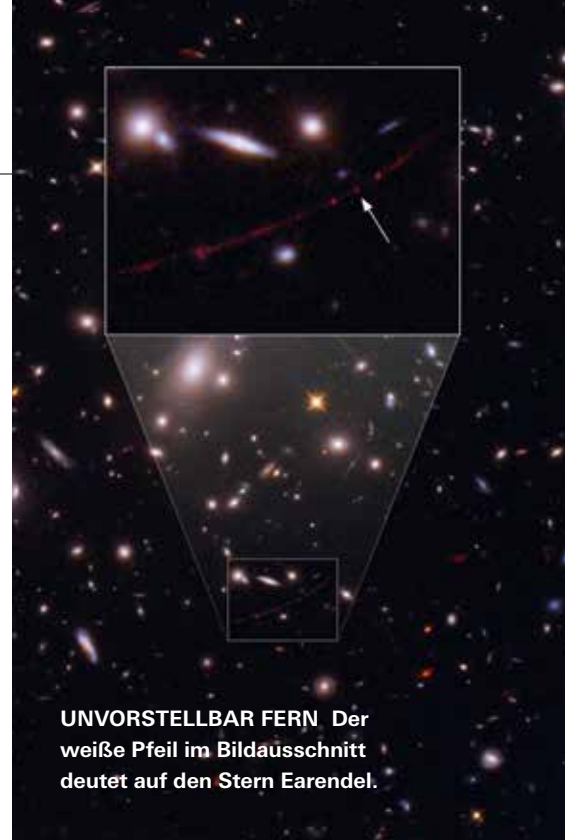
Normalerweise lassen sich derart ferne Sonnen überhaupt nicht mehr einzeln beobachten: Sie sind viel zu leuchtschwach. Doch im Fall von Earendel half der so genannte Gravitationslinseneffekt nach. Er entsteht, wenn eine große Masse zwischen uns und einem fernen Himmelskörper liegt, die mit ihrer Schwerkraft dessen Licht auf uns bündelt und somit verstärkt. Den Effekt hatte bereits Albert Einstein im Jahr 1936 vorhergesagt, aber erst Jahrzehnte später konnten Astronomen ihn tatsächlich beobachten.

Mittlerweile spüren Forscherinnen und Forscher alle möglichen Himmelsobjekte dank des Gravitationslinseneffekts auf. Sterne beispielsweise, die

als Gravitationslinsen fungieren, können einsame Planeten sichtbar machen, die allein durchs All driften. Massereiche Galaxienhaufen wiederum krümmen die Bahnen des Lichts von dahinterliegenden Objekten – und lenken deren Lichtstrahlen so auf verschiedenen Wegen zu uns. Das kann dazu führen, dass wir diese Objekte mehrfach sehen: Ein Quasar im Sternbild Pegasus etwa erscheint als berühmtes »Einstein Kreuz« gleich viermal am Himmel.

Auch einzelne, weit entfernte Sterne haben Astronomen und Astronomen bereits mit Gravitationslinsen aufgespürt. Das gelang bisher aber nur für Himmelskörper, deren Licht nicht länger als 9 Milliarden Jahre zu uns unterwegs war. Earendel hingegen ist viel weiter weg: Sein Licht brauchte 12,9 Milliarden Jahre, um uns zu erreichen. Ein Galaxienhaufen im Vordergrund verstärkt seine scheinbare Helligkeit um einen Faktor von mehreren tausend, so dass er auf Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops zu erkennen ist.

Laut dem Forscherteam könnte Earendel in dem Stadium, in dem wir



**UNVORSTELLBAR FERN** Der weiße Pfeil im Bildausschnitt deutet auf den Stern Earendel.

ihn heute sehen, einem Einzel- oder einem Doppelsternsystem angehört haben. Vermutlich war er damals ein wahrer Riese, der es auf mehr als 50 Sonnenmassen brachte. Mittlerweile dürfte von ihm nicht mehr viel übrig sein: Wegen seiner großen Masse ist er inzwischen wohl längst als Supernova explodiert – und sein Licht nicht auf-, sondern untergegangen.

*Nature* 10.1038/s41586-022-04449-y, 2022

## ÖKOLOGIE KÜSTENSTÄDTE SINKEN SCHNELLER, ALS DER MEERESSPIEGEL STEIGT

In vielen Küstenstädten senkt sich das Land ab, während zugleich der Meeresspiegel infolge des menschengemachten Klimawandels steigt. Das Zusammenspiel erhöht das Risiko von Überschwemmungen deutlich, wie ein Team um den Ozeanografen Meng Wei von der University of Rhode Island in Narragansett darlegt.

Üblicherweise nutzen Wissenschaftler bodengestützte Instrumente, um Landabsenkungen zu messen. Doch diese sind nicht überall verfügbar. Um einen weltweiten Überblick zu bekommen, haben Wei und seine Forschungsgruppe deshalb Satellitendaten analysiert, die zwischen 2015

und 2020 für 99 Küstenstädte gesammelt worden waren. Messwerte zur Bodenhöhe, die alle zwei Monate erhoben worden waren, lassen erkennen, wie sich die Erdoberfläche im Lauf der Zeit veränderte – auflösbar nach einzelnen Stadtteilen.

Demnach sinkt in vielen Stadtgebieten das Land schneller ab, als der Meeresspiegel steigt. Im pakistanischen Karatschi beträgt der Höhenverlust mehr als zehn Millimeter pro Jahr, das ist das Fünffache des durchschnittlichen Meeresspiegelanstiegs. In Tianjin (China) sowie in Jakarta erreicht die jährliche Absenkung sogar mehr als 30 Millimeter.

In den meisten Fällen, so die Vermutung der Wissenschaftler, dürfte die Bodensenkung ebenfalls menschengemacht sein und auf dem Abpumpen von Grundwasser beruhen. Sie verschärft die Risiken, die der Meeresspiegelanstieg mit sich bringt, zum Teil erheblich. Wei und seine Kollegen hoffen, dass ihre Arbeit zu neuen Strategien führt, um die Grundwasserentnahme auf die jeweiligen Überschwemmungsrisiken abzustimmen und so weit wie möglich zu minimieren.

*Geophysical Research Letters* 10.1029/2022GL098477, 2022



## PALÄO BIOLOGIE

### FRÜHE SÄUGETIERE HATTEN KLEINES GEHIRN

► In der frühen Erdneuzeit stiegen die Säuger zur dominanten Wirbeltiergruppe auf. Möglich wurde ihnen das aber nicht etwa dank überragender Hirnleistungen, im Gegenteil: Ihre relative Gehirngröße schrumpfte zunächst sogar. Vielmehr setzten sie sich damals durch, indem sie an Körpergröße und Muskelmasse zulegten. Zu dem Ergebnis kommen Forscherinnen und Forscher um Ornella Bertrand von der University of Edinburgh.

Vor 66 Millionen Jahren endete die Kreidezeit mit einem weltweiten Massenaussterben, dem unter anderem die Dinosaurier (abgesehen von den Vögeln) zum Opfer fielen. Die dabei frei werdenden ökologischen Nischen vereinnahmten später die Säugetiere. So entwickelten sie sich zur beherrschenden Wirbeltiergruppe. Viele Fachleute vermuten bisher, die Säuger hätten dabei von ihrem vergleichsweise großen und leistungsfähigen Gehirn profitiert.

Bertrand und ihr Team haben Säugerfossilien von mehr als 120 ausgestorbenen Arten untersucht, darunter dutzende neu entdeckte fossile Schädel aus der frühen Erdneuzeit. Mit Röntgenstrahlen durchleuchteten sie die Überreste und fertigten computertomografische (CT-) Aufnahmen davon an. Anhand der CT-Scans ließ sich abschätzen, wie groß das Gehirn der Tiere einst gewesen war und welche Abmessungen jene Hirnareale gehabt hatten, die Sinneseindrücke wie Riechen oder Sehen verarbeiteten. Dies setzten die Wissenschaftler in Beziehung zu den Körpergrößen der Tiere.

Demnach legten die Säuger im Paläozän (66 bis 56 Millionen Jahre vor heute) erheblich an Größe und Muskelmasse zu. Ihr Gehirn wuchs auch, aber in geringerem Ausmaß. Die relative (auf die Körpermasse bezogene) Gehirngröße schrumpfte somit. Außerdem ergaben die Untersuchungen, dass bei den damaligen Säugetieren jene Hirnregionen, die für das Sehen zuständig waren, einen

eher kleinen Anteil des Organs ausmachten.

Erst im nachfolgenden Zeitalter des Eozäns (56 bis 34 Millionen Jahre vor heute) tauchten vermehrt Säugerspezies auf, bei denen die relative Hirngröße wieder zunahm. Bei ihnen hatten sich besonders solche Gehirnregionen vergrößert, die visuelle Sinneseindrücke verarbeiten, für die Bewegungssteuerung wichtig sind und integrative (verschiedene Informationen aus der Außen- und Innenwahrnehmung verknüpfende) Funktionen ausüben.

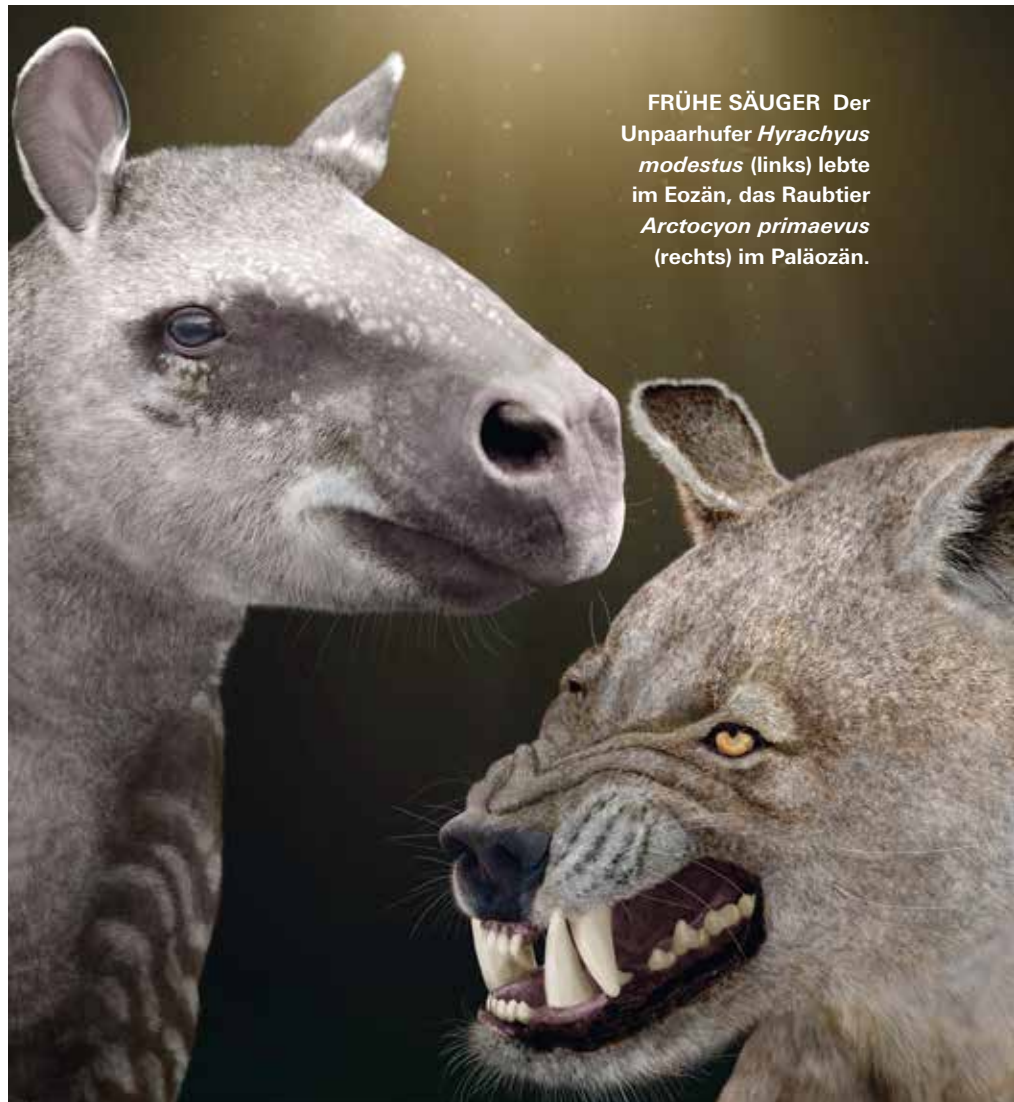
Studien belegen, dass Säugetiere mit größerem Gehirn besser darin sind, kognitiv anspruchsvolle Probleme zu lösen, und sich im Verhalten flexibler zeigen. Anscheinend seien solche Fähigkeiten in den Jahrmillionen, nachdem die Dinosaurier ver-

schwunden und freie Nischen zu erobern waren, aber nicht vorrangig gefragt gewesen, folgert die Arbeitsgruppe. Es habe sich damals offenbar ausgezahlt, groß und stark statt intelligent zu sein.

Im Eozän, als sich die Ökosysteme weitgehend erholt hatten und die Nischen wieder besetzt waren, intensivierte sich die Verteilungskämpfe, wie das Team postuliert. Säuger mit besseren Sinnesleistungen und erweiterten motorischen Fähigkeiten seien jetzt im Vorteil gewesen, was einen Selektionsdruck in Richtung Hirnwachstum erzeugt habe. Besonders Raubtiere und Allesfresser legten nun an relativer Gehirngröße zu – und überflügelten hierin die damaligen Pflanzenfresser.

*Science* 10.1126/science.abc15584, 2022

SARAH SHELLEY



**FRÜHE SÄUGER** Der Unpaarhufer *Hyrachyus modestus* (links) lebte im Eozän, das Raubtier *Arctocyon primaevus* (rechts) im Paläozän.

## ARCHÄOLOGIE WARUM DIE NORDMÄNNER GRÖNLAND AUFGABEN

► Im frühen Mittelalter besiedelten Nordmänner den Süden Grönlands, verließen ihn aber einige Jahrhunderte später wieder. Fachleute spekulieren, eine Abkühlung während der so genannten kleinen Eiszeit könnte die Siedler im 15. Jahrhundert gezwungen haben, ihre Ortschaften aufzugeben. Ein Forscherteam um Raymond Bradley von der University of Massachusetts Amherst widerspricht dem nun.

Bradley und seine Arbeitsgruppe haben Messdaten erhoben, die es erlauben, das Mikroklima im ehemaligen Siedlungsraum der Nordmänner zu rekonstruieren. Sie nahmen einen Bohrkern aus dem Sediment eines Sees, der nicht weit entfernt von einer verlassenem mittelalterlichen Ortschaft im südlichen Grönland liegt. Mit Hilfe dieser Probe ließen sich die Wetterveränderungen der zurückliegenden 2000 Jahre verfolgen.

Das Verzweigungsmuster bestimmter Lipidmoleküle, die von Mikroben stammen und sich Jahr für Jahr im Sediment absetzen, erlaubte Rückschlüsse auf die damaligen jährlichen Umgebungstemperaturen. Die Menge von wachsartigen Molekülen wiederum, die auf den Blattoberflächen von Pflanzen als Verdunstungsschutz dienen, zeigte die frühere Luftfeuchtigkeit an. Wie die Probenanalyse belegt,

ist es in der Kleinen Eiszeit im südlichen Grönland nicht ungewöhnlich kalt gewesen – die Durchschnittstemperaturen blieben vom 10. bis ins 15. Jahrhundert nahezu gleich. Hingegen nahm die Trockenheit in dieser Phase zu. Das muss gravierende Folgen gehabt haben, denn die Nordmänner waren darauf angewiesen, ihr Vieh mit eingelagertem Futter über den Winter zu bringen.

Wahrscheinlich konnten die Siedler angesichts sich verschärfender Dürre irgendwann nicht mehr genug anbauen, schreiben die Wissenschaftler um Bradley. Den Kolonisten war das Problem offenbar bewusst: Am Ende der Siedlungsphase begannen sie, Bewässerungsgräben für ihre Felder anzulegen – eine letztlich unzureichende Gegenmaßnahme. Außerdem griffen sie zunehmend auf Beutetiere aus dem Meer zurück.

In den südöstlichen Siedlungen hatten zur Blütezeit der Grönlandbesiedlung bis zu 2000 Menschen gelebt. Weitere Ansiedlungen gab es im Westen der Insel. Diese hatten die Nordmänner allerdings noch früher aufgegeben: Ein norwegischer Priester traf dort schon 1350 keine lebenden »Grænendingar« mehr an.

*Science Advances 10.1126/sciadv.abm4346, 2022*



## CHEMIE ROHSTOFFE AUS KUNSTSTOFFABFALL

► Mit einem neuen Verfahren zum Kunststoffrecycling lässt sich Polystyrol – Hauptbestandteil von Styropor – in kleine Moleküle zerlegen, die als Grundstoffe für die chemische Industrie dienen. Nötig seien nur Licht, Luft und einfaches Eisen(III)-chlorid, berichten die Chemiker Sewon Oh und Erin Stache von der Cornell University in Ithaca (New York). Die beiden haben Polystyrol in Azeton gelöst und im Beisein von Eisenchlorid und Luftsauerstoff 20 Stunden lang mit weißem Licht bestrahlt. Dabei zerfielen die langen Molekülketten des Kunststoffs in kurze Fragmente, überwiegend Benzolringe mit angehängten Gruppen aus Kohlenstoff, Sauerstoff sowie weiteren Elementen. Diese so genannten Benzoylverbindungen dienen in zahlreichen chemischen Prozessen als wichtige Ausgangsstoffe.

Die von Oh und Stache entwickelte Methode basiert auf dem Zersetzen der Polymerketten mit Hilfe von Chlorradikalen und Sauerstoff. Licht spaltet die Bindung zwischen Chlor und Eisen, so dass chemisch reaktionsfreudige Chloratome entstehen. Letztere entreißen den Molekülketten des Polystyrols die Wasserstoffatome an den Stellen, wo die Bausteine des Polymers miteinander verknüpft sind. Dadurch wiederum greift Sauerstoff dort an und zerlegt das Kettenmolekül in ebene Grundbausteine. Laut den Fachleuten



ZWISCHEN EIS UND MEER  
Ein See nahe einer früheren  
Nordmänner-Siedlung in  
Südgrönland.



**LUFTIG Aufgeschäumtes Polystyrol, hier in Gestalt von aufeinander gestapelten Platten, dient als leichtes Verpackungs-, Dämm- und Baumaterial.**

WOLFGANG PRINCK / STOCK.ADOBE.COM

funktioniert der Prozess sehr effizient. Das wichtigste Produkt sei Benzoesäure, ein Grundstoff der chemischen Industrie.

Die Technik zeigt einen innovativen Ansatz zum nachhaltigen Kunststoffrecycling auf. Bei den meisten herkömmlichen Wiederverwertungsverfahren lässt die Materialqualität stetig nach, weil die langen Polymerketten immer weiter zerfallen. Die neue Methode erlaubt es, den Kunststoff in einfache Fragmente zu zerlegen und aus diesen frische Produkte zu erzeugen. Man bezeichnet solche Verfahren, die wichtige Grundstoffe zurückgewinnen, als »Upcycling« – im Gegensatz zum »Downcycling«, das minderwertige Materialien hervorbringt, die nur noch eingeschränkt nutzbar sind.

Upcycling erfordert oft viel Energie und aggressive Chemikalien, um die Kunststoff-Polymerketten zu zersetzen, und es entstehen dabei vielfach problematische Abfälle. Nicht so bei der von Oh und Stache vorgestellten Technik: Sie setzt auf relativ einfach zu handhabende Stoffe, die sich nach dem Prozess potenziell zurückgewinnen lassen. Weitere Experimente belegten zudem, dass das Verfahren mit Stoffmengen von mehreren Gramm funktioniert und nicht nur, wie in den ersten Versuchen, einigen Milligramm. Demnach könnte es sich recht einfach hochskalieren lassen – wichtig für großtechnische Anwendungen.

*Journal of the American Chemical Society*  
10.1021/jacs.2c01411, 2022

## PHYSIK QUANTENREIBUNG IN KOHLENSTOFF-NANORÖHREN

► Wenn Wasser durch Kohlenstoff-Nanoröhren fließt, gelten fremdartige Gesetze. Wie ein Team um Nikita Kavokine von der Sorbonne Universität in Paris berichtet, tritt dann ein Reibungsphänomen auf, das in radikalem Gegensatz zur Alltagserfahrung steht. Die Forscherinnen und Forscher schreiben, die Ursache hierfür sei ein quantenmechanischer Effekt: Elektronenzustände in den Kohlenstoff-Nanoröhren treten in Resonanz mit kollektiven Schwingungen der Wassermoleküle und bremsen sie dadurch.

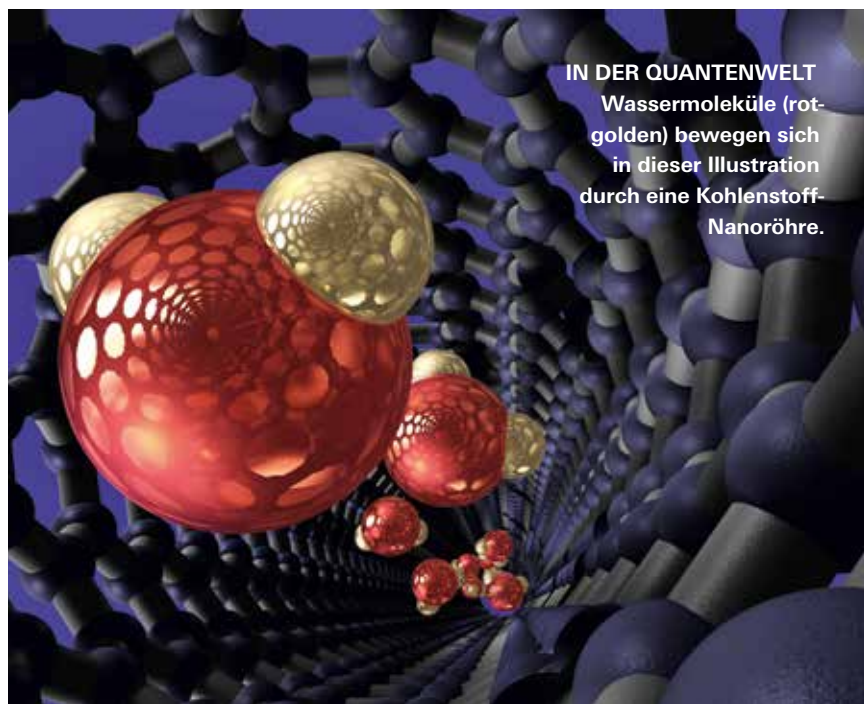
Fließt Wasser durch eine Kohlenstoffnanoröhre, die von mehreren Wänden zwiebelschalenartig umhüllt ist, wirkt eine extrem geringe Reibung. Weil die Röhre steif und innen sehr glatt ist, verlieren die Moleküle kaum Energie durch Stöße. Paradoxerweise nimmt die Reibung zu, wenn der Innendurchmesser einer solchen Röhre wächst. Mit anderen Worten, enge Öffnungen setzen dem Wasser weniger Widerstand entgegen als weite.

Wie die Arbeitsgruppe schreibt, besitzen Plasmonen (Schwingungszustände frei beweglicher Elektronen) in einer mehrwandigen Kohlenstoff-Nanoröhre ähnliche Energien wie kollektive Schwingungszustände der

hindurchströmenden Wassermoleküle. Deswegen koppeln beide miteinander und tauschen Energie aus, was sich als Reibung bemerkbar macht. Bei einer einwandigen Röhre funktioniert das nicht, denn dort fehlt den Elektronen quasi eine Dimension zum Schwingen, so dass ihre Plasmonen völlig andere Energien besitzen. Infolgedessen treten sie kaum in Wechselwirkung mit den hindurchfließenden Wassermolekülen, und es entsteht nur wenig zusätzliche Reibung.

Jede Verkleinerung des Durchmessers der Kohlenstoff-Nanoröhren führt zu einer deutlich stärkeren Krümmung der Rohrwand. Das hat weitreichende Folgen für die Plasmonen. Bei mehrwandigen Röhren mit 50 Nanometer Innendurchmesser liegen die Wände zumindest näherungsweise glatt aufeinander, was zu einer intensiven Wechselwirkung zwischen ihnen führt. Bei mehrwandigen Röhren mit zehn Nanometer Innendurchmesser dagegen krümmen sich die Wände so stark, dass sie untereinander praktisch entkoppelt sind. Die dort auftretenden Plasmonen ähneln deshalb jenen in einwandigen Röhren – und lassen Wasser weitgehend ungehindert passieren.

*Nature* 10.1038/s41586-021-04284-7, 2022



**IN DER QUANTENWELT**  
Wassermoleküle (rot-golden) bewegen sich in dieser Illustration durch eine Kohlenstoff-Nanoröhre.

THEASIS / GETTY IMAGES / ISTOCK

# ALTERN WIE LANGE KÖNNEN WIR LEBEN?

Es ist eine der ältesten Forschungsfragen der Welt, wie weit sich die menschliche Lebensspanne ausdehnen lässt. Antworten darauf sorgen regelmäßig für Streit unter Fachleuten – das Thema ist bis heute nicht geklärt.



Michael Eisenstein ist Wissenschaftsjournalist in Philadelphia, USA.

» [spektrum.de/artikel/2008750](https://www.spektrum.de/artikel/2008750)

## AUF EINEN BLICK AN DER GRENZE DES SEINS

- 1** Weltweit steigt seit Jahrzehnten die Lebenserwartung; zunehmend mehr Menschen werden mehr als 100 Jahre alt.
- 2** Manche Fachleute vermuten, dass sich die menschliche Lebensspanne immer weiter ausdehnen lässt. Andere gehen von einer natürlichen Grenze aus, über die hinaus das prinzipiell nicht möglich ist.
- 3** Neue biomedizinische Errungenschaften könnten den Alterungsprozess verzögern. Noch ist solch ein Durchbruch aber nicht in Sicht.





SERIE

## Altern

Teil 1: Juni 2022

**Wie lange können wir leben?**

Michael Eisenstein

**Was uns altern lässt**

Emily Sohn

Teil 2: Juli 2022

**Länger jung dank zellulärer Müllabfuhr?**

Elie Dolgin

Teil 3: August 2022

**Alternde Gesellschaften**

Benjamin Plackett

**AM LIMIT** Hat das menschliche Leben eine Obergrenze – oder lässt sich unsere Zeit auf Erden beliebig verlängern?

Der französische Philosoph und Mathematiker Marie Jean Antoine Nicolas de Caritat, Marquis de Condorcet, diskutierte im letzten Kapitel seines aufklärerischen Werks »Entwurf einer historischen Darstellung der Fortschritte des menschlichen Geistes« ein Thema, das die Wissenschaft bis heute beschäftigt: »Ohne Zweifel wird der Mensch nicht unsterblich werden; aber kann nicht der Abstand zwischen dem Augenblick, in dem er zu leben beginnt, und der Zeit sich unablässig vergrößern, da sich bei ihm von Natur aus, ohne dass er krank wäre oder einen Unfall erlitten hätte, die Schwierigkeit zu sein bemerkbar macht?«

Die Frage, ob sich das Leben beliebig verlängern lässt, ist Gegenstand reger Debatten. Während viele Fachleute davon ausgehen, dass sich die Lebensspanne des modernen Menschen einer natürlichen Obergrenze nähert, sehen andere keine Beweise dafür – die Diskussionen sind oft hitzig.

Laut Jean-Marie Robine, Demograf am Institut national de la santé et de la recherche médicale, Frankreichs nationalem biomedizinischem Forschungsinstitut in Paris, ist die Frage nach den Grenzen des menschlichen Lebens »möglicherweise die älteste Forschungsfrage überhaupt«. Selbst wenn es kein formales physiologisches Limit gibt, ist es kein leichtes Unterfangen, bis zum Äußersten an Lebensfähigkeit vorzudringen. Erhebliche medizinische Fortschritte sind nötig, um die Langlebigkeit über das heutige Maß hinaus zu verlängern – auch wenn es weltweit immer mehr 100-Jährige gibt.

Der britische Mathematiker und Versicherungsstatistiker Benjamin Gompertz war einer der Ersten, die die Grenzen der menschlichen Lebensspanne auszuloten versuchten. Im Jahr 1825 zeigte er anhand einer Analyse demografischer Aufzeichnungen, dass das Risiko zu sterben für einen Menschen ab Ende 20 Jahr für Jahr exponentiell steigt – irgendwo sollte es demnach einen Horizont geben, an dem es schließlich 100 Prozent beträgt.

»Gompertz vermutete dahinter ein allgemein gültiges Naturgesetz, ähnlich dem newtonschen Gesetz der Schwerkraft«, sagt S. Jay Olshansky, Epidemiologe und Gerontologe an der University of Illinois in Chicago. Heute, fast 200 Jahre später, ist Gompertz' Arbeit immer noch einflussreich. Zwar hat sich dank des medizinischen Fortschritts die Zeitskala etwas verschoben, aber sein Modell scheint das Muster der altersbezogenen Sterblichkeit für einen beträchtlichen Teil der menschlichen Lebensspanne immer noch genau abzubilden.

So schätzten Caleb Finch und Malcolm Pike von der University of Southern California in Los Angeles im Jahr 1996 die maximale menschliche Lebenserwartung in einer mathematischen Analyse auf der Basis des Gompertz-Modells auf etwa 120 Jahre: eine vernünftige Obergrenze, wenn man bedenkt, dass zu dem Zeitpunkt nur eine einzige Person dieses Alter erreicht hatte.

### 120 – Obergrenze oder bald normale Lebenserwartung?

Die Autoren spekulierten jedoch auch, medizinische Fortschritte – etwa bei der Kontrolle des Alterungsprozesses oder der Behandlung chronischer Krankheiten – könnten die Kurve theoretisch verändern. Vielleicht werde die Grenze von 120 Jahren eines Tages zu einer normalen Lebenserwartung.

Es stellt sich also die Frage, wie flexibel das Gompertz-Modell ist. Heute erreichen immer mehr Menschen ein Alter, das noch vor wenigen Generationen als außergewöhnlich galt. Nach Schätzungen der Vereinten Nationen lebten im Jahr 2020 weltweit etwa 573 000 über 100-Jährige, das sind mehr als 20-mal so viele wie 50 Jahre zuvor. Und Hunderte von Menschen weltweit zählen sogar zu den »Supercentenarians«, sind also 110 Jahre oder älter. Allerdings haben Demografen nur bei einem Bruchteil von ihnen geprüft, ob ihre Altersangaben tatsächlich stimmen. Den derzeitigen Lebenszeitrekord hält bislang die Französin Jeanne Calment: Sie ist im Jahr 1997 mit 122 Jahren

## Die Ältesten werden immer älter

Name	Geburtsjahr	Todesjahr	Alter	Ort
<b>Geert Boomgaard</b>	1788	1899	110 Jahre, 135 Tage	Groningen, Niederlande
<b>Margaret Ann Neve</b>	1792	1903	110 Jahre, 321 Tage	Guernsey, Kanalinseln
<b>Louisa Thiers</b>	1814	1926	111 Jahre, 138 Tage	Milwaukee, Wisconsin, USA
<b>Delina Filkins</b>	1815	1928	113 Jahre, 214 Tage	Richfield Springs, New York, USA
<b>Fannie Thomas</b>	1867	1981	113 Jahre, 283 Tage	Los Angeles, Kalifornien, USA
<b>Anna Eliza Williams</b>	1873	1987	114 Jahre, 208 Tage	Swansea, UK
<b>Jeanne Calment</b>	1875	1997	122 Jahre, 164 Tage	Arles, Frankreich

QUELLE: YOUNG, R.D. ET AL.: LIVING AND ALL-TIME WORLD LONGEVITY RECORD-HOLDERS OVER THE AGE OF 110. GERONTOLOGICAL RESEARCH 13, 2010, TABLE 1



DPA / PICTURE ALLIANCE

**JEANNE CALMENT lebte 122 Jahre und 164 Tage lang. Noch nie ist jemand älter geworden.**

und fünf Monaten verstorben (siehe »Die Ältesten werden immer älter«).

Diese Entwicklungen haben die Debatte darüber angeheizt, wie weit wir noch gehen können. Der Genetiker Jan Vijg vom Albert Einstein College of Medicine in New York City hat 2016 die in Frankreich, Japan, den Vereinigten Staaten und dem Vereinigten Königreich gemeldeten Höchstaltersgrenzen analysiert. Wie die Daten zeigten, ist es äußerst unwahrscheinlich, länger als 125 Jahre zu leben. Der Vorschlag einer de facto maximalen Lebenserwartung sorgte für heftigen Streit und zog zahlreiche öffentliche Reaktionen nach sich. Kritik gab es sowohl an den verwendeten statistischen Methoden als auch an der Interpretation der Ergebnisse.

Zwei Jahre später veröffentlichte eine Gruppe um die Demografin Elisabetta Barbi von der Universität La Sapienza in Rom eine Studie über Italiener im Alter von über 105 Jahren und zweifelte damit Vijgs Ergebnisse an. Laut den Daten ihres Teams erreicht die Gompertz-Kurve in solchem extremen Alter ein Plateau, auf dem sich das Sterberisiko für alle folgenden Lebensjahre auf etwa 50 Prozent abschwächt (Sterberisiko bedeutet das Risiko, vor Vollendung des nächsten Lebensjahrs zu sterben). Demnach gebe es also keine feste Grenze dafür, wie lange ein Mensch leben kann. Aber auch über diese Ergebnisse entspannen sich heftige Debatten.

Eine der größten Herausforderungen bei der Untersuchung der »Supercentenarians« ist die schlechte – oder manchmal gar gezielt gefälschte – Dokumentation. »Es gibt so viele falsch gemeldete Fälle«, erklärt James Vaupel, Biodemograf und Gründungsdirektor des Max-Planck-Instituts für demografische Forschung in Rostock, der die Studie von Barbi mitverfasst hat. Mal seien Schreibfehler das Problem oder die Gedächtnisschwierigkeiten der

greisen Probanden, doch in manchen Fällen schienen deren Familien auch schlicht unwahre Angaben zu machen, um Aufmerksamkeit zu erhalten.

Die Auswirkung auf die Daten sei letztlich dieselbe, sagt Leonid Gavrilov, der die menschliche Langlebigkeit bei der Forschungsorganisation NORC an der University of Chicago untersucht. Die Fehlangaben verzerren die demografischen Daten, die dann ein geringeres Sterberisiko im hohen Alter suggerieren.

Jeder Versuch, die hochbetagten Alten zu befragen und ihr Alter zu verifizieren, erfordert daher erhebliche Detektivarbeit. »Man muss im Grunde ihr gesamtes Leben nachverfolgen«, meint Vaupel.

Für ihre Analyse hat Barbi streng geprüfte Daten aus der Internationalen Datenbank für Langlebigkeit (IDL) verwendet. Die IDL wurde von einem Netzwerk von Gerontologen und Demografen, darunter Vaupel und Robine, entwickelt und stützt sich auf eine sorgfältige Überprüfung von Geburtsurkunden, Taufscheinen, Volkszählungsdaten und anderen Informationsquellen, um die Angaben jeder Person zu bestätigen. Dennoch gibt Vaupel zu, dass die Datenqualität noch nicht optimal ist.

### Ohne Zahlen keine Statistik

In der Tat hat eine Studie von Gavrilov und seiner Frau und Kollegin, der Biodemografin Natalia Gavrilova, aus dem Jahr 2020 den Nutzen der IDL für Vorhersagen über Langlebigkeitstrends in der Bevölkerung in Frage gestellt. Ihrer Meinung nach ist ein anderer validierter Datensatz über Hochbetagte, der von der Gerontology Research Group in Los Angeles gepflegt wird, dafür besser geeignet. Anhand dessen ermittelte das Forscherpaar, dass die Sterberate jenseits von 113 Jahren weiterhin steil ansteigt.

Das Problem, an das alle Modelle für das Erleben extremen Alters stoßen, ist ein mathematisches: Es gibt nicht genügend Daten. »Das Plateau kommt zu Stande, weil es zu wenige Menschen gibt, um zuverlässige Sterbestatistiken zu erstellen«, erläutert Olshansky. Daraus

können sich irreführende oder ungenaue Trends ergeben, die erst verschwinden, wenn mehr Daten zur Verfügung stehen. So war es auch bei Gompertz' ursprünglichem Modell: Jenseits von 85 Jahren – einem im 19. Jahrhundert sehr hohen Alter – verlor es seine Vorhersagekraft.

Vaupel bleibt jedoch bei seinen Ergebnissen. »Die Zahlen sind bis zum Alter von 114 Jahren brauchbar«, betont er. »Und wenn ein Plateau zwischen 105 und 114 Jahren existiert, besteht kein Grund, warum es enden sollte.«

Wie spärlich die Daten wirklich gesät sind, zeigt wiederum der Fall der ältesten Frau Jeanne Calment: Ihr Lebensrekord von 122 Jahren und fünf Monaten ist nicht nur ungebrochen, sondern auch unangefochten. Die nächste Anwärterin auf den Titel der ältesten Person der Welt, Sarah Knauss, verstarb 1999 im Alter von 119 Jahren. Schon der extreme Ausreißer an sich hat für Disput gesorgt: Im Jahr 2019 behauptete der in Moskau lebende Mathematiker und Wirtschaftswissenschaftler Nikolay Zak, Calment sei in Wirklichkeit bereits Jahrzehnte zuvor verstorben und ihre damals älteste Tochter habe ihre Identität angenommen. Robine hingegen kannte die Französin und hat ihr hohes Alter bestätigt.

Der wissenschaftliche Konsens stützt Calments Behauptung. Laut Vaupel bleiben solche Rekorde oft viele Jahre lang ungebrochen, das zeige auch die Mathematik der Extremwerttheorie, die die Wahrscheinlichkeiten von außergewöhnlich seltenen oder sogar noch nie da gewesenen Ereignissen bewertet. 2019 schätzten er und sein Kollege Anthony Medford die Wahrscheinlichkeit, dass Calments Lebensalter bis 2050 unübertroffen bleibt, auf 20 Prozent.

Dass so wenige Menschen ein solch hohes Alter erreichen, unterstreicht eine größere statistische Wahrheit, die unabhängig davon gilt, ob die Sterblichkeit ein Plateau erreicht oder nicht. »Das Optimistischste, was man sagen kann: Nach dem Alter von 105 Jahren steigt die Wahrscheinlichkeit zu sterben nicht mehr«, formuliert es Brandon Milholland, Datenwissenschaftler beim Gesundheitsdatenunternehmen IQVIA in New York City und Mitverfasser von Vijgs Arbeit aus dem Jahr 2016.

### **Weniger Kindersterblichkeit, bessere Medizin ...**

Denn wenn das Plateau tatsächlich existiert, verdoppelt sich die Zahl der lebenden 110-Jährigen, die es braucht, um einen Überlebenden jenseits eines Alters hervorzubringen, für jedes weitere Jahr Langlebigkeit ungefähr. »Die Wahrscheinlichkeit, länger als 120 oder 125 Jahre zu leben, ist damit verschwindend gering«, folgert Steven Austad, Gerontologe an der University of Alabama in Birmingham. Und wenn es sich bei dem Plateau nur um ein Artefakt handelt, schrumpfen die Chancen erst recht.

Vermutlich steigt die Chance, dass einzelne Personen ein extrem hohes Alter erreichen, wenn die durchschnittliche Lebenserwartung wächst. Denn dann existieren immer mehr über 100-Jährige. Deren Zahl ist bereits merklich gewachsen, da die Säuglings- und Kindersterblichkeit geringer ist als früher und chronische sowie ansteckende Krankheiten besser behandelbar sind.



**KANE TANAKA** wurde am 2. Januar 1903 geboren. Sie ist seit 2018 der älteste lebende Mensch.

So ist die Lebenserwartung in Schweden und Japan seit 1840 jedes Jahr um bis zu drei Monate gestiegen, wie Vaupel 2002 ermittelt hat. In der Tat haben japanische Frauen derzeit mit 87 Jahren die höchste durchschnittliche Lebenserwartung. Ob sich diese Fortschritte fortsetzen werden, ist allerdings offen: In den Vereinigten Staaten und im Vereinigten Königreich beispielsweise hat sich die Lebenserwartung in den letzten zehn Jahren kaum verbessert.

Geht es nach Shripad Tuljapurkar, Biodemograf an der Stanford University in Kalifornien, lässt sich jedoch ein Großteil dieser Stagnation auf den Anstieg der vorzeitigen Sterblichkeit durch Drogen- und Alkoholmissbrauch, Selbstmord und andere »Todesfälle aus Verzweiflung« zurückführen. Laut einer Studie, die er 2018 mit Kollegen veröffentlichte, hat sich die Lebenserwartung von Menschen in ihren 60ern in den Vereinigten Staaten, Japan und Schweden in den letzten Jahrzehnten stetig verbessert. »Aus meiner Sicht ist die wichtigste Erkenntnis, dass immer längeres Leben möglich ist«, urteilt er. »Und diese Entwicklung verlangsamt sich meines Erachtens nicht.«

In Ländern mit geringem und mittlerem Einkommen haben die Menschen eine niedrigere Lebenserwartung als in wohlhabenden Ländern. Hier kann sich aber auch am



meisten verändern. Schätzungen der Weltbank zufolge lag die weltweit durchschnittliche Lebenserwartung im Jahr 2019 bei 71 Jahren – zwei Jahrzehnte vorher waren es noch sechs Jahre weniger.

Auch Robine glaubt an die steigende Lebenserwartung. 2021 ermittelte er in einer Veröffentlichung der Vereinten Nationen aus französischen Demografiedaten das höchste Alter, das mindestens 30 Personen erreichten, die in einem betreffenden Jahr starben. So wollte er die störenden Auswirkungen seltener Ausreißer wie Calment auf die Langlebigkeit der Bevölkerung eliminieren. Seine bemerkenswerten Erkenntnis: Diese Kennzahl stieg zwischen 1946 und 2016 linear von 99 auf 109 Jahre.

### ... und trotzdem kaum Fortschritt jenseits der 100

Wie er ebenfalls anmerkt, erleben wir möglicherweise jedoch ein Phänomen namens Mortalitätskompression – das legen zumindest die Daten nahe: Die Bevölkerung überlebt im Allgemeinen bis ins hohe Alter, ohne die Grenzen der Langlebigkeit deutlich zu überschreiten. Ein ähnliches Muster sieht Gavrilov. »Die Überlebenschancen bis zum Alter von 100 Jahren haben sich deutlich verbessert, doch die verbleibende Lebenserwartung ab dem Alter von 100 Jahren ist gleich geblieben. Hier war in den letzten 80 Jahren kein Fortschritt zu verzeichnen.«

Einer der grundlegenden Gräben in dieser Debatte verläuft zwischen der Demografie und den Lebenswissenschaften. »Wenn mathematische Demografen die biologischen Kräfte nicht berücksichtigen, die die von ihnen betrachteten Statistiken beeinflussen, schätzen sie unrealistische künftige Lebenserwartungen ab«, sagt Olshansky.

Laut Milholland haben Gerontologen neun zelluläre und molekulare Merkmale identifiziert, die eng mit dem Altern und der Sterblichkeit verbunden sind. Sie reichen von der Verkürzung der Telomere, die sich an den Enden der Chromosomen befinden und genetische Schäden verhindern, über die Anhäufung defekter Proteine und giftiger Stoffwechselprodukte bis zur Abnutzung von Stammzellen. Für Milholland sind solche Pannen natürliche und unvermeidliche Folgen des jahrelangen Betriebs einer komplizierten zellulären Maschinerie.

»Warum sollten diese Prozesse im Alter von 110 Jahren plötzlich zum Stillstand kommen?«, fragt er. Menschen, die über jenes hohe Alter hinaus auf der Erde weilen, haben vielleicht genetische Merkmale, die es ihnen ermöglichen, einige der Alterungsprozesse abzumildern – und derzeit laufen zahlreiche Genomstudien, um ebendas zu untersuchen –, aber vielleicht brechen ab einem gewissen Alter einfach zu viele Prozesse zusammen.

Wie einige Studien nahelegen, können Eingriffe in die Stoffwechselaktivität oder Änderungen der Ernährung die Lebenserwartung von Fliegen, Würmern und sogar Mäusen deutlich steigern. Allerdings sind die Auswirkungen in den Tiermodellen wahrscheinlich verzerrt, gibt Olshansky zu bedenken: »Das Problem ist: Je länger eine Spezies grundsätzlich lebt, desto weniger Nutzen für die Langlebigkeit ist von jeder Art von Intervention zu erwarten.« Nur weil eine Behandlung einen Wurm mehrere Monate statt ein paar Wochen lang leben lässt, beschert

sie dem Menschen nicht gleich mehrere Jahrhunderte auf dem Planeten.

Auch wenn Durchbrüche bei der Behandlung von Krankheiten bei Kindern und Erwachsenen den Weg zu einer erheblich längeren Lebenserwartung geebnet haben, bezweifelt Austad, dass ähnliche Fortschritte bei altersbedingtem Gebrechen große Auswirkungen haben werden. Ein Leiden wie die Alzheimerkrankheit mache nur einen kleinen Teil aller Todesfälle aus, und selbst wenn man Erkrankungen mit höherer Sterblichkeitsrate wie Krebs stoppen könne, werde sich die Lebenserwartung nicht sehr stark verlängern. »Heilt man diese Krankheit, verlängert sich die Lebenserwartung um zwei Jahre, und im äußersten Fall wahrscheinlich nicht einmal das«, erklärt er.

Solcher Pessimismus mag überraschen angesichts einer Wette, die Austad im Jahr 2000 öffentlich mit Olshansky abgeschlossen hat: Der erste Mensch, der 150 Jahre alt werden würde, sei bereits geboren. Seine Zuversicht gründete jedoch auf der Erwartung, dass bis dahin biomedizinische Fortschritte den Alterungsprozess erfolgreich verzögern können.

Ob ein solcher Durchbruch bevorsteht, ist unklar. Nach weitgehend einhelliger Ansicht der Fachleute könnten derartige medizinische Eingriffe aber einen Wendepunkt darstellen – wenn sie auch Condorcets Vision der Beinahe-Unsterblichkeit nie erfüllen werden. »Ich glaube, es gibt eine Grenze«, ist Milholland überzeugt, »doch sie ist nicht unverrückbar.« ◀

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema:  
[spektrum.de/t/altern](https://www.spektrum.de/t/altern)



ISTOCK / DRUVO

### QUELLEN

**Barbi, E. et al.:** The plateau of human mortality: Demography of longevity pioneers. *Science* 360, 2018

**Dong, X. et al.:** Evidence for a limit to human lifespan. *Nature* 538, 2016

**Gavrilova, N. S., Gavrilov, L. A.:** Are we approaching a biological limit to human longevity? *The Journals of Gerontology: Series A* 75, 2020

**Otín, C. L. et al.:** The hallmarks of aging. *Cell* 153, 2013

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

## nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](https://www.nature.com)  
Nature 601, S. S2–S4, 2022



# BIOMEDIZIN WAS UNS ALTERN LÄSST

Infektionskrankheiten, Einsamkeit und Stress wirken sich darauf aus, wie schnell der Organismus vergreist. Das hat Folgen für die Gesundheit und die Lebenserwartung.



Emily Sohn arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Minneapolis, Minnesota.

» [spektrum.de/artikel/2008753](https://spektrum.de/artikel/2008753)



**ISOLIERT** Die Distanzmaßnahmen in der Covid-19-Pandemie hatten zur Folge, dass zahlreiche Menschen vereinsamten. Das betraf besonders Ältere in Heimen, die monatelang keinen Besuch empfangen durften. Vielen hat das geschadet: Einsamkeit ist sehr belastend und führt zu beschleunigter Vergreisung.

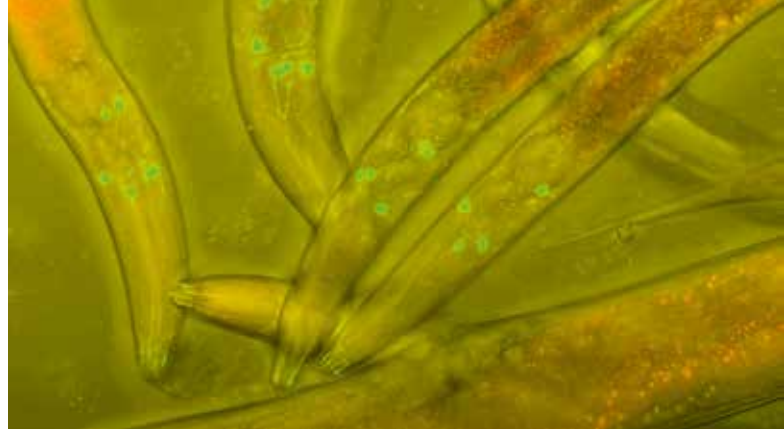
Seit die Covid-Pandemie wütet, leben wir mit Distanz- und Isolationsmaßnahmen. Etliche von uns mussten große Veränderungen im beruflichen wie sozialen Bereich hinnehmen; überall herrscht Verunsicherung. Zahlreiche Menschen haben in diesen Zeiten das Gefühl, schneller zu altern als vorher. Das ist nicht so weit hergeholt, wie es zunächst klingt. Verschiedene Faktoren führen tatsächlich zu einer beschleunigten Vergreisung; manche davon stehen mit der Pandemie in Zusammenhang. Infektionskrankheiten, chronischer Stress und Einsamkeit beeinflussen unseren Gesundheitszustand und das Tempo, in dem wir altern – und können unser Leben verkürzen.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler untersuchen individuelle Alterungsprozesse immer genauer. Dabei zeigt sich, dass einige Personen bemerkenswert widerstandsfähig gegenüber Stressbelastungen sind. Eine Beobachtung, die die Frage aufwirft, ob sich mit einem geeigneten Lebensstil das Altern verlangsamen lässt.

Noch vor wenigen Jahrzehnten hielten Fachleute die Vergreisung für einen Vorgang, der bei allen Personen weitgehend gleich abläuft, erinnert sich Luigi Ferrucci, Geriater und Epidemiologe am US National Institute on Aging in Baltimore, Maryland. Es fiel zwar auf, dass manche Menschen länger gesund bleiben als andere und deutlich fitter sind als numerisch Gleichaltrige. Aber es schien keine Möglichkeit zu geben, den physischen und kognitiven Abbau zu beeinflussen, den Betagte erfahren.

Das begann sich laut Ferrucci in den 1980er Jahren zu ändern. Damals beobachteten Forscherinnen und Forscher an Fadenwürmern der Spezies *Caenorhabditis elegans*: Kleine genetische Veränderungen können mit einer beträchtlich längeren Lebensdauer einhergehen. Dies deutete darauf hin, dass der Alterungsprozess bei den Tieren aktiv reguliert wird, sich also modifizieren lässt. Weitere Arbeiten wiesen ähnliche Effekte bei Mäusen und anderen Säugern nach. Auch beim Menschen scheinen einige Genmutationen mit extremer Langlebigkeit in Verbindung zu stehen.

Und es sind nicht nur die Erbanlagen, die sich auf das Altern auswirken. Eine wachsende Zahl von Studien zeigt: Das Tempo, in dem wir vergreisen, hängt ebenso von unserem Verhalten ab – etwa davon, wie viele Kalorien wir



**LANGLEBIG Fadenwürmer (*Caenorhabditis elegans*) werden älter, wenn sie gewisse Mutationen tragen, die die Funktion des Wachstumsfaktors IGF-1 betreffen.**

uns zuführen und welche Medikamente wir einnehmen. Diese Faktoren haben einen Einfluss auf die Lebensdauer und darauf, wie lange wir gesund bleiben.

Wie die Studien vermuten lassen, können wir mit einem geeigneten Lebensstil den Alterungsprozess verlangsamen. Falls dem so wäre, hätte das gravierende Folgen für die Medizin, betont Ferrucci. Statt gesundheitliche Komplikationen wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen oder Krebsleiden jeweils einzeln zu behandeln, ließen sich Anti-Aging-Methoden entwickeln, die viele solcher Probleme auf einmal angehen. »Wir wissen immer noch sehr wenig darüber, wie wir Patienten, die an mehreren Krankheiten zugleich leiden, am besten helfen können. Und diese Menschen machen den Großteil jener aus, die eine dauerhafte ärztliche Behandlung benötigen.«

### Epigenetische Uhren zeigen biologisches Alter an

Die Biologie des Alterns und seine Auswirkungen auf die Gesundheit besser zu verstehen, könnte neue Ansätze liefern, um die Vergreisung aufzuhalten. Dafür benötigen Wissenschaftler jedoch erst einmal ein Verfahren, mit dem sich die Alterungsrate verlässlich messen lässt.

Einer der meistversprechenden Ansätze hierfür, die Epigenetik, macht sich den Umstand zu Nutze, dass das DNA-Molekül an etlichen Stellen chemisch modifiziert ist: Es haften Methylgruppen daran, welche die Aktivität der Gene regulieren (siehe etwa »Spektrum« August 2017, S. 29). In einigen Regionen des Genoms reichern sich Methylgruppen im Lauf der Zeit immer weiter an, und zwar in vorhersehbaren Mustern. Im Jahr 2013 entwickelten Forscher von der University of California, Los Angeles, und der Sichuan University in China spezielle Methoden, um das Methylierungsmuster einer Person zu ermitteln und darauf basierend ihr epigenetisches Alter zu berechnen.

Diese »epigenetischen Uhren« seien immer ausgefeilter, präziser und verlässlicher geworden, sagt Ferrucci. Anhand einer Blut- oder Gewebeprobe können Wissenschaftler jetzt das epigenetische Alter einer Person bestimmen und mit ihrem chronologischen vergleichen. Menschen, deren epigenetisches Alter über dem chronologischen liegt, leiden öfter an beeinträchtigter Gesundheit sowie Schmerzen und tragen ein höheres Risiko für einen vorzeitigen Tod. Der Zusammenhang ist zwar nicht sehr ausgeprägt, aber dennoch signifikant, wie Studien belegen.

## AUF EINEN BLICK HINAUSGEZÖGERTE HINFÄLLIGKEIT

- 1** Menschen altern unterschiedlich schnell. Das ist an Veränderungen in ihren Körperzellen erkennbar.
- 2** Wie betagt eine Zelle ist, lässt sich anhand molekularer Merkmale ermitteln, etwa des DNA-Methylierungsmusters oder der Telomerlänge.
- 3** Infektionen, Vereinsamung und Stress können zu beschleunigtem Altern führen. Bewegung, gesunde Ernährung und das Vermeiden von Übergewicht erhöhen hingegen die Lebenserwartung.

Epigenetische Uhren sind nicht die einzigen molekularen Messmethoden, über die Wissenschaftler verfügen. Laut Ronald DePinho, Onkologe am MD Anderson Cancer Center in Houston, geht Altern mit diversen Verfallserscheinungen einher, darunter vermehrtem Zelltod, entzündlichen Prozessen und Stoffwechselkomplikationen. Sie resultieren unter anderem aus einer nachlassenden Mitochondrienfunktion, einer beeinträchtigten Zell-Zell-Kommunikation sowie einer verminderten DNA-Reparatur. Umfangreiche Forschungsarbeiten haben ergeben: Die degenerativen Prozesse des Alterns schlagen sich in einer eingeschränkten Funktion der so genannten Telomere nieder – lang gestreckter Abschnitte aus DNA und Proteinen an den Enden unserer Chromosomen. Telomere verkürzen sich im Lauf des Lebens, weshalb ihre Länge ein Maß für das biologische Alter ist. Viele Fachleute bestimmen das Zellalter anhand dieses Biomarkers.

Zu nennen ist in dem Zusammenhang ebenso die Proteomik, das ist die Erforschung der Gesamtheit aller Proteine, die ein Lebewesen unter definierten Bedingungen produziert. Forscher suchen nach Eiweißen, die mit altersassoziierten Vorgängen wie Entzündung und Zelltod in Verbindung stehen. Ferrucci und sein Team haben 651 Proteine identifiziert, auf die das zutrifft. In einer Studie von 2020 beschrieben sie, wie sich anhand von 76 jener Substanzen eine »proteomische Alterssignatur« ermitteln lässt, die das Risiko chronischer Krankheiten sowie das Sterberisiko anzeigt.

Während die Zahl der molekularen Messmethoden zur Altersbestimmung wächst, »verfeinern wir sie fortlaufend, bis wir etwas finden, was gut genug für den klinischen Einsatz ist«, wie Ferrucci schildert. Mediziner hoffen, mit diesen Verfahren feststellen zu können, ob eine Person vorschnell vergreist – um ihr dann mit passenden Behandlungen zu helfen. Weiterhin lässt sich damit vielleicht beurteilen, ob bestimmte Eingriffe den altersbedingten Abbau verlangsamen.

Nicht nur genetische Unterschiede beeinflussen, wie schnell Menschen altern, sondern auch Verhaltensweisen und Lebenserfahrungen einschließlich der durchgemachten Infektionskrankheiten. Studien belegen beispielsweise, dass eine HIV-Infektion die Degeneration und den Untergang von Immunzellen beschleunigt. Und das Virus Sars-CoV-2, das Covid-19 verursacht, scheint in manchen Fällen chronische Entzündungen und eine vorzeitige biologische Alterung herbeizuführen.

Früh in der Pandemie zeigte sich, dass betagten Menschen, vor allem solchen mit Vorerkrankungen, bei einer Sars-CoV-2-Infektion schwere Symptome drohen – von unkontrollierten Entzündungsreaktionen, so genannten Zytokinstürmen, bis hin zum Tod. Das könnte unter anderem daran liegen, dass Seniorinnen und Senioren oft unter ausgeprägten Entzündungen leiden und entsprechend hohe Spiegel an Entzündungsmarkern im Blut haben, vermutet Ferrucci. Laut einer Studie von italienischen Forschern um Aurelia Santoro von der Universität Bologna erhöhen chronisch-entzündliche Prozesse das Risiko für schwere Covid-Symptome, Herz-Kreislauf-Komplikationen, Nierenerkrankungen, Demenz, Tumorleiden und andere Probleme.

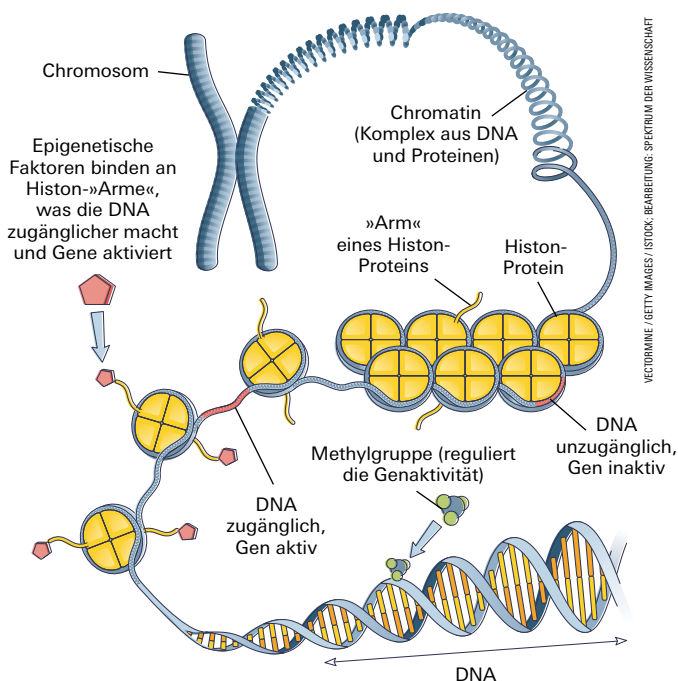
Bei Covid-19 scheinen mehrere Mechanismen das entzündliche Geschehen voranzutreiben. Zu ihnen zählt die zelluläre Seneszenz – das Phänomen, dass Körperzellen sich auf Grund fortgeschrittener Alterung nicht mehr teilen und DNA-Schäden anhäufen. Sie löst DePinho zufolge eine Kaskade von Immunreaktionen aus, bei denen unter anderem Zytokine und weitere entzündungsfördernde Substanzen ausgeschüttet werden. Zelluläre Seneszenz spielt ebenso bei Krebs, Arthrose und anderen altersbedingten Krankheiten eine Rolle.

### Virusbefall erschöpft den Organismus

Reagiert der Organismus mit heftigen Entzündungen auf eine Infektion, kann dies das Immunsystem langfristig schwächen. Alterungsprozesse können sich dadurch beschleunigen, da ihnen die beeinträchtigte Körperabwehr weniger entgegenwirkt. »Die Kompensationsmechanismen betroffener Personen sind wegen des Ressourcen verschlingenden Kampfs gegen die Viren erschöpft«, sagt Ferrucci.

Ein weiterer Treiber der Vergreisung ist Stress. Die Covid-19-Pandemie etwa war selbst für Menschen, die sich nicht infizierten, überaus kräftezehrend, wie Laura Fonken von der University of Texas in Austin betont. Der Verlust des Arbeitsplatzes, die enorm gestiegenen Lasten der Kinderbetreuung, vermehrte häusliche Konflikte, eingebüßte soziale Kontakte und die Sorge um die Gesundheit geliebter Menschen haben zu Überforderung, Ängsten und Erschöpfung geführt. Dass die Schulen monatelang geschlossen blieben, stellte Eltern vor kaum zu stemmende Herausforderungen: Sie mussten ihre Kinder selbst unterrichten und beaufsichtigen und

### EPIGENETISCHE MECHANISMEN Sie hängen eng mit dem Altern zusammen. Das Methylierungsmuster der DNA etwa ändert sich im Lauf des Lebens.



gleichzeitig ihrer eigenen Arbeit nachgehen sowie den erhöhten Aufwand für Haushaltstätigkeiten bewältigen.

Empirische Befunde deuten darauf hin, dass übermäßiger Stress zu beschleunigtem Altern führt. Hält er über lange Zeiträume hinweg an, steigt das Risiko für Herzkomplikationen, Diabetes, Krebserkrankungen und andere chronische Leiden. Das betrifft sowohl betagte als auch junge Menschen.

Studien zufolge kommen Kinder aus schwierigen sozioökonomischen Verhältnissen früher in die Pubertät als solche aus wohlhabenden Haushalten. Das geht mit zahlreichen Gesundheitsproblemen und einer verkürzten Lebenserwartung einher. Wenn verstörende Kindheitserlebnisse zu Traumata und einer Posttraumatischen Belastungsstörung (PTBS) führen, kann sich das später in Form von verfrühten Alterserscheinungen bemerkbar machen.

Die Psychologin Erika Wolf von der Boston University hat US-Militärveteranen untersucht, die Anfang 30 waren und im Irak beziehungsweise in Afghanistan gedient hatten. Bei ihnen stellte die Psychologin vermehrt das so genannte metabolische Syndrom fest. Zu dessen Symptomen gehören Fettleibigkeit und Bluthochdruck, die wiederum das Risiko von Diabetes, Herzproblemen und Alzheimerdemenz erhöhen. Andere Studien haben bei Veteranen, die an PTBS erkrankt waren, ein gehäuftes Vorkommen des metabolischen Syndroms, früh einsetzende Alzheimer-Erscheinungen und weitere Formen der Demenz festgestellt.

Wolf und ihr Team nahmen bei jungen Veteranen zudem epigenetische Analysen vor. Dabei zeigte sich: Jene, die unter einer Posttraumatischen Belastungsstörung litten, waren epigenetisch überdurchschnittlich stark gealtert. Das galt besonders für Personen mit pathologisch erhöhter Wachsamkeit (»Hypervigilanz«), gesteigerter Aggressionsneigung und schlechterem Schlaf. Veteranen mit PTBS, bei denen sich Anzeichen einer beschleunigten Alterung zeigten, schnitten in kognitiven Tests schlechter ab und wiesen strukturelle Schäden in den Hirnbereichen auf, die für so genannte exekutive Funktionen wie Handlungsplanung verantwortlich sind.

Studien an gestressten Tieren wiederum belegen, dass die Immunzellen in ihrem Gehirn denen in einem alternden Zentralnervensystem zu ähneln beginnen. Sie neigen dazu, entzündliche Prozesse voranzutreiben, wie Laura Fonken schildert. Lang anhaltende, schwelende Entzündungen können die kognitive Leistungsfähigkeit beeinträchtigen. Von Covid-19 ist bekannt, dass es mitunter in Long-Covid-Symptome wie »Hirnebel« mündet.

Um herauszufinden, wie Stress und Gehirn miteinander verknüpft sind, setzen Erika Wolf und ihre Kollegen die Magnetresonanztomografie (MRT) ein, die hochauflösende Bilder vom Körperinneren liefert. Damit untersuchen sie ältere Veteranen mit derzeit durchschnittlich 65 Lebensjahren, die sie seit 15 Jahren wissenschaftlich beobachten. Die Forscher messen deren Gedächtnisfunktion, erfassen Biomarker für Entzündungen des Nervensystems und andere Größen, die auf die Hirngesundheit schließen lassen. Sie hoffen so, bestmöglich vorhersagen zu können, wer am stärksten von kognitivem Abbau und beschleunigter Alterung infolge von Traumata und chronischem Stress bedroht ist.

Bereits jetzt deuten die Daten darauf hin, dass Covid-19 die Beziehung zwischen Stress und Altern klarer hervortreten lässt. Zu Beginn der Pandemie hatten die besonders schwer von PTBS Betroffenen häufig einen problematischen Alkoholkonsum. Wer exzessiv trank, erkrankte wiederum mit höherer Wahrscheinlichkeit an Covid-19, was seinerseits entzündliche Prozesse und die Vergreisung vorantrieb. Die Ergebnisse belegen insgesamt, dass Menschen in einen Kreislauf aus chronischem Stress, Verschlechterung der Gesundheit und beschleunigter Alterung geraten können.

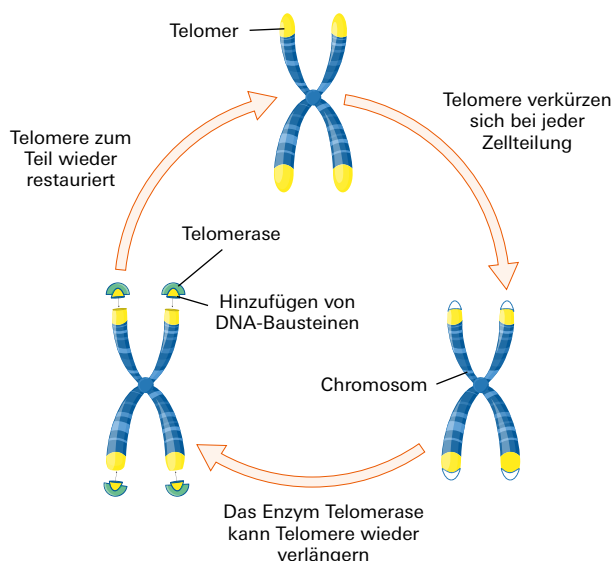
### **Dauerstress führt zu früher Vergreisung**

Es ist nicht klar, wie genau Stress das Altern beschleunigt, aber laut einigen Studien steht er mit einer verkürzten Telomerlänge in Zusammenhang. Der Grund scheint zu sein, dass ein erhöhter Spiegel des Stresshormons Kortisol Telomere abbauende Prozesse fördert, vor allem über lange Zeiträume hinweg (siehe auch »Spektrum« November 2018, S. 52). Forscherinnen und Forscher um Elissa Epel von der University of California in San Francisco zeigten 2004: Bei Frauen vor der Menopause hatten jene mit dem stärksten Stressempfinden deutlich verkürzte Telomere; der Effekt entsprach einer vorzeitigen Alterung um rund zehn Jahre. Einige der beteiligten Autoren legten 2016 eine weitere Studie vor, die Daten von mehr als 4500 Personen aus einem Zeitraum von 16 Jahren umfasste. Die Auswertung dieser Daten ergab, dass negative Ereignisse in der Kindheit, beispielsweise Missbrauchserfahrungen, mit einer verminderten Telomerlänge im Erwachsenenalter zusammenhängen. Jedes traumatisierende Kindheitserlebnis erhöht demnach das Risiko, als erwachsener Mensch verkürzte Telomere zu haben, um elf Prozent.

Telomerschwund beeinträchtigt vermutlich die Fähigkeit unserer Körperzellen, Schäden zu reparieren. »Indem chronischer Stress den Alterungsprozess vorantreibt, könnte er

### **VETERAN IN THERAPIE Kriegsheimkehrer, die unter einer Posttraumatischen Belastungsstörung leiden, zeigen Anzeichen vorzeitiger Alterung.**





**TELOMERE An den Enden der Chromosomen sitzen »Schutzkappen« aus DNA und Proteinen, die Telomere. Sie werden im Lauf des Lebens tendenziell kürzer.**

die Widerstandsfähigkeit unseres Organismus untergraben«, fasst Ronald DePinho zusammen. Die Zusammenhänge sind freilich komplex und beschränken sich nicht nur auf molekulare und zelluläre Mechanismen. Wie Wolf betont, spielen hier auch Verhaltensweisen eine Rolle, die mit PTBS in Verbindung stehen, etwa Alkoholkonsum und schlechte Ernährung. Zudem haben die Erbanlagen einen Einfluss. Bei Menschen mit einer bestimmten Mutation im Gen *Klotho* etwa zeigt sich die Verknüpfung zwischen PTBS und beschleunigtem epigenetischem Altern besonders deutlich.

Und noch ein Faktor kann zu früher Vergreisung führen: Einsamkeit. Zu Beginn der Covid-19-Pandemie, im April 2020, ordneten 89 Länder mehr oder weniger harte Lockdowns an, die mehr als ein Drittel der Weltbevölkerung betrafen, wie die Gerontologin Bei Wu von der New York University in einer Studie vorrechnete. Die Distanzmaßnahmen wirkten sich vor allem auf ältere Menschen aus, da diese häufiger unter schweren Covid-19-Symptomen litten und deshalb oft isoliert wurden. Pflegeheime schlossen ihre Türen für Besucher; zahlreiche Gesundheitsdienste und Sozialprogramme stellten ihre Arbeit ein.

Das unfreiwillige Alleinsein, das daraus folgte, ist ein weiterer Risikofaktor für beschleunigtes Altern. Wu und andere Forscher haben in Untersuchungen belegt: Soziale Isolation und Einsamkeit gehen mit einem deutlich höheren Risiko für Demenz, Schlaganfall und koronare Herzkrankheit einher – allesamt altersbedingte Krankheiten. Einsamkeit ist zudem assoziiert mit einer gesteigerten Häufigkeit von Depressionen, Angststörungen, Fettleibigkeit, Bluthochdruck, kognitivem Abbau und vorzeitigem Tod.

Soziale Isolation ist eine wirksame Strategie, um die Ausbreitung von Infektionskrankheiten zu verlangsamen. Aber sie könnte vielen Covid-19-Kranken die Genesung erschwert haben, sagt DePinho. Mehrere Studien an Mäusen haben gezeigt: Vereinsamung nach einem Schlaganfall

bewirkt, dass sich die Tiere schlechter erholen, sowohl körperlich als auch hinsichtlich kognitiver Funktionen. Die Belastung des Alleinseins dürfte ein Hauptgrund dafür sein.

Obwohl Stress, Isolation und Krankheiten die Gesundheit beeinträchtigen und die Alterung beschleunigen können, ist einigen Menschen selbst nach extremen Entbehrungen ein langes und gesundes Leben beschieden. Dazu gehören manche Holocaust-Überlebende, die ein Alter von 90 und höher erreichten. Fachleute wüssten gern, was diese Menschen so widerstandsfähig macht und inwieweit andere etwas daraus für sich selbst lernen können.

Vielleicht, so die Hoffnung, lässt sich der Alterungsprozess mit geeigneten Maßnahmen verlangsamen – gerade angesichts der vielen Stressfaktoren und Belastungen, die das heutige schnelllebige Dasein mit sich bringt. In Tierversuchen an Mäusen haben DePinhos Team sowie andere Arbeitsgruppen herausgefunden, dass es die Lebensspanne um mehr als ein Drittel verlängern kann, wenn man seneszente Körperzellen aus dem Organismus entfernt. Von einer Anwendung am Menschen sind diese Erkenntnisse freilich noch weit weg. Was bleibt, sind evidenzbasierte Tipps rund um den Lebensstil, wie sich die Alterung verzögern lässt.

So können 15 Minuten Bewegung täglich die Lebenserwartung um fünf Jahre erhöhen und das Risiko einer altersassoziierten Erkrankung wie Alzheimer, Krebs und Diabetes (Typ 2) um 14 Prozent verringern, wie DePinho betont. Meditation senkt den Kortisolspiegel, das Vermeiden von Übergewicht wirkt entzündlichen Prozessen entgegen, und eine überwiegend pflanzliche Ernährung mit viel Obst und Gemüse dämpft oxidativen Stress im Organismus ein. Hilfreich ist zudem, nicht zu rauchen, wenig Alkohol zu trinken und ausreichend zu schlafen. »Wir haben zahlreiche Erkenntnisse aus Tierexperimenten, die darauf hindeuten, dass Bewegung und Ernährung einen großen Einfluss auf zelluläre Alterungsprozesse haben«, sagt Erika Wolf. »Es gibt offensichtlich Möglichkeiten, in dieses Geschehen einzugreifen.« ◀

**QUELLEN**

**Epel, E. et al.:** Lifespan adversity and later adulthood telomere length in the nationally representative US Health and Retirement Study. *PNAS* 113, 2016

**Hannum, G. et al.:** Genome-wide methylation profiles reveal quantitative views of human aging rates. *Molecular Cell* 49, 2013

**Santoro, A. et al.:** Inflammaging: A new immune-metabolic viewpoint for age-related diseases. *Nature Reviews: Endocrinology* 14, 2018

**Tanaka, T. et al.:** Plasma proteomic biomarker signature of age predicts health and life span. *eLife* 9, 2020

**Uno, M., Nishida, E.:** Lifespan-regulating genes in *C. elegans*. *NPJ Ageing and Mechanisms of Disease* 2, 2016

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

**nature**

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
 Nature 601, S. S5–S7, 2022

## PRÄZISIONSMESSUNGEN RELATIVISTISCHER EFFEKT AUF DER MILLIMETERSKALA

Normalerweise zeigen sich die seltsamen Auswirkungen der Relativitätstheorie erst bei extremen Geschwindigkeiten oder Distanzen. Neue Uhren sind nun so präzise, dass sie die gravitative Zeitdilatation innerhalb einer einzigen Atomwolke nachweisbar machen.

**LASERFALLE** In einer optischen Atomuhr werden Atome in einem Vakuumbehälter stark gekühlt und von Lasern manipuliert und ausgelesen.

► Laut Albert Einsteins Relativitätstheorie verzerrt ein Gravitationsfeld seine Umgebung und lässt Raum und Zeit anders erscheinen, je nachdem, wo man sich befindet. So vergeht die Zeit für eine Person, die sich an Bord eines Flugzeugs aufhält, minimal langsamer als für eine auf dem Erdboden. Aber solche Auswirkungen lassen sich üblicherweise selbst mit modernsten Zeitmessern nur feststellen, wenn die Unterschiede groß sind. So gelangen erste experimentelle Nachweise des Zeitdilatation genannten Effekts in den 1970er Jahren mit Atomuhren in Flugzeugen, auf Berggipfeln oder in einer Rakete. Sie liefen gegenüber identischen Instrumenten auf dem tiefer gelegenen Erdboden stets minimal schneller. Die Auswirkungen sind klein, können jedoch bei Präzisionstechnologien entscheidend sein. Heute funktioniert Navigation mittels GPS-Satelliten allein

deswegen, weil die abweichende Zeitwahrnehmung der Geräte in der 20000 Kilometer hohen Umlaufbahn korrigiert wird. Dazu hat jeder Satellit eine Atomuhr an Bord.

Um den zeitverzögernden Einfluss des Schwerfelds der Erde grundsätzlich zu messen, sind derartige Höhenunterschiede allerdings schon lange nicht mehr nötig – dank fortschrittlicher Quantentechnologie. 2010 gelang es etwa mit einer hochgenauen optischen Atomuhr, die sich weniger als einen Meter über einer zweiten befand, eine Abweichung beim Takt festzustellen.

Nun sind gleich zwei Laborversuche in einen völlig neuen Bereich vorgestoßen. Für einen Vergleich der gravitativen Zeitdilatation braucht es jetzt nicht mehr zwei separate Instrumente, sondern nurmehr die Atome innerhalb eines einzelnen Aufbaus. Es genügt ein Lageunterschied von

wenigen Millimetern innerhalb derselben Atomwolke. Das wird weitaus detailliertere Kartierungen von Gravitationsfeldern ermöglichen als bisher üblich. Umgekehrt demonstriert es: Bei hochgenauer Quantentechnologie können sich sogar winzige Schwankungen des Gravitationsfelds auf die Messungen auswirken.

Beide Versuchsaufbauten basierten auf dem Prinzip der besten heutigen Zeitmesser, nämlich optischen Atomuhren. Alle Atomuhren nutzen als Taktgeber die charakteristischen Energien, bei denen Elektronen in den Hüllen bestimmter Atome zwischen verschiedenen Niveaus wechseln. Solch ein Übergang wird durch Strahlung ausgelöst; bei klassischen Atomuhren sind das Mikrowellen, bei modernen optischen ist es Laserlicht. Dessen Schwingungen sind viel hochfrequenter, was die Genauigkeit verbessert, aber die praktische Handha-



bung komplizierter macht. Die Teilchen müssen in einem »optischen Gitter« gefangen gehalten werden, das bei der exakten Überlagerung mehrerer Laserstrahlen entsteht.

Will man die Zeit mit einer optischen Atomuhr messen, hat man grundsätzlich mit zwei abträglichen Einflüssen auf die Präzision zu kämpfen. Zunächst sind das äußere Effekte auf die einzelnen Atome. So wirken sich Unregelmäßigkeiten im elektromagnetischen Feld der Laser auf die Energien aus, bei denen die Übergänge stattfinden. Das lässt sich über lange Zeit herausmitteln oder indem man viele Atome verwendet. Dann kommt aber die zweite Art von Einfluss zum Tragen: Mehrere Atome interagieren, sie stoßen beispielsweise zusammen, was die Frequenzen ebenfalls verändert.

### Perlenkette atomarer Uhren

Eines der beiden neuen Experimente wurde von Tobias Bothwell aus der Gruppe von Jun Ye durchgeführt, einem weltweit führenden Experten für solche Messungen von der University of Colorado Boulder. Ye arbeitet dort seit zwei Jahrzehnten daran, die Genauigkeit seiner optischen Uhren immer weiter zu erhöhen. Für ein möglichst starkes Signal verwendete Bothwell eine Wolke aus rund 100000 Strontiumatomen. Um Wech-

selwirkungen zwischen diesen zu unterbinden, waren die Atome auf den Bruchteil eines Grads über dem absoluten Temperaturnullpunkt abgekühlt. Zusammen mit präzise abgestimmten Energiemulden im optischen Gitter unterdrückte das etwaige Kollisionen sehr effizient und für die Atome regelrecht fest.

Letztlich waren die Pakete in der lang gezogenen Atomwolke auf ihren Plätzen im optischen Gitter aufgereiht wie auf einer herabhängenden Perlenkette. Die Forscher fotografierten die Teilchen einerseits direkt mikroskopisch und vermaßen andererseits ihre Frequenzen mittels Spektroskopie. Entlang der Schwerkraftachse waren die oberen Werte der einen Millimeter kleinen Wolke leicht ins Blaue, die unteren ins Rote verschoben. Die festgestellten Unterschiede passen genau zu dem, was rechnerisch laut der Relativitätstheorie von zwei Uhren zu erwarten wäre, die in entsprechend unterschiedlichen Höhen im irdischen Gravitationsfeld platziert werden. Das gelang nur, weil das Hintergrundrauschen aus allen anderen frequenzverschmierenden Einflüssen auf zuvor unerreichte Werte reduziert wurde. Somit ist die Uhr in Jun Yes Labor nicht nur die erste, innerhalb der sich die Auswirkung der Zeitdilatation zeigt, sondern zugleich die bis dato präziseste der Welt.

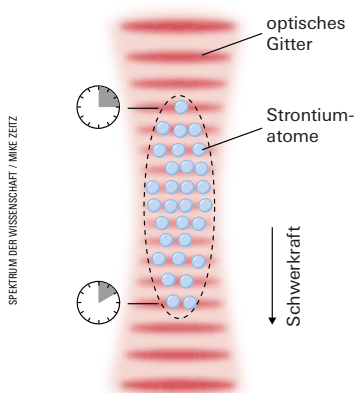
Gleichzeitig hat ein konkurrierendes Forscherteam an der University of Wisconsin-Madison daran gearbeitet, die Leistungsfähigkeit optischer Uhren mit einem etwas anderen Prinzip zu verbessern. Dort ordnete Xin Zheng gemeinsam mit seinen Kollegen aus der Arbeitsgruppe von Shimon Kolkowitz mehrere Wolken aus je einigen hundert Strontiumatomen in einem Abstand von knapp einem Zentimeter übereinander an. Dieses von den Wissenschaftlern Multiplex genannte System besteht also gewissermaßen aus mehreren räumlich getrennten Uhren in einem einzigen Experiment. Zheng konnte bis zu sechs von ihnen parallel vermessen und miteinander vergleichen. Das Konzept verbessert die zeitliche Präzision, indem die Mittelung über den gesamten Multi-

plex lokale Instabilitäten des Lasers ausgleicht. Grundsätzlich würde es außerdem ermöglichen, die Takte der obersten und der untersten Uhr in Relation zu setzen. Zumindest rechnerisch dürfte das den von der Relativitätstheorie vorausgesagten Unterschied liefern, denn die Genauigkeit des Multiplex ist zwar grob um den Faktor zehn geringer als bei Bothwell, aber dafür der Abstand der einzelnen Uhren zehnmal größer. Für ihre Veröffentlichung, die in derselben Ausgabe des Fachjournals »Nature« im Februar 2022 erschien, haben die Autoren jedoch nicht ausprobiert, Einstein auf die Probe zu stellen. Jedenfalls ist auch die Uhr aus Kolkowitz' Gruppe eine bemerkenswerte Leistung. Ohne den gleichzeitigen Coup des Teams um Ye wäre sie jetzt der Rekordhalter.

Die Fortschritte bei hochpräziser Zeitmessung sind rasant. Bereits 2018 demonstrierten Forschungsteams, unter anderem eines um Jun Ye, bei Atomuhren eine Präzision, mit der sich zumindest im Prinzip feststellen ließe, ob das Instrument um weniger als einen Zentimeter angehoben wurde. Das freilich wäre angesichts der komplexen Gesamtkonstruktion kein leichtes Unterfangen. Darum ist es ein spannender nächster Schritt, dass nun Unterschiede registriert werden können, die sich innerhalb eines laufenden Experiments und zudem innerhalb ein und derselben Atomwolke ergeben. Es braucht keine zwei Geräte mehr zum Abgleich, und deswegen ist das weit mehr als nur eine bloße weitere Rekordmeldung.

### Quantentests für die Schwerkraft

Die Entwicklung weist einerseits den Weg zu noch empfindlicheren Sensoren. Bothwells Gruppe hat mit ihrer neuen Bestmarke gezeigt, was unter maximal optimierten Bedingungen möglich ist. Währenddessen ist die Multiplex-Uhr von Zheng zwar etwas ungenauer, aber robuster, auch weil ihr Aufbau einfacher und mit weniger spezialisierten kommerziellen Komponenten gelungen ist. Das Prinzip findet somit vermutlich eher den Weg aus dem Labor zur Anwendung. Andererseits wird die Messtechnik nun viel-



**ATOMUHR MIT ZEITDILATATION**  
Die Schwingung von Strontiumatomen ändert sich mit dem Gravitationsfeld. Für höher gelegene Atome vergeht die Zeit schneller.

leicht sogar für Tests interessant, mit denen sich eine Brücke zwischen den beiden großen und bisher notorisch unvereinbaren Naturtheorien schlagen lassen könnte. So schreibt Jun Yes Gruppe in ihrer Veröffentlichung: »Uhren werden die Vereinigung der allgemeinen Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik vorantreiben, sobald sie empfindlich genug werden, um die Einflüsse der gekrümmten

Raumzeit auf die Wellenfunktion von Quantenobjekten zu registrieren.« Tatsächlich scheint die nun erreichte Präzision nicht mehr weit entfernt davon zu sein, die Schwerkraft entlang des Wirkungsbereichs eines einzelnen Teilchens zu vermessen. Die Suche nach Modellen zur Verbindung der beiden getrennten Welten kann solche neuen experimentellen Impulse dringend brauchen. ◀

**Mike Zeitz** ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

## QUELLEN

**Bothwell, T. et al.:** Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample. *Nature* 602, 2022

**Zheng, X. et al.:** Differential clock comparisons with a multiplexed optical lattice clock. *Nature* 602, 2022

## ABELPREIS 2022 PENDLER ZWISCHEN DEN WELTEN

**Die höchste Auszeichnung der Mathematik geht an Dennis Parnell Sullivan für seine Arbeit an Ordnung und Chaos in zwei völlig unterschiedlichen Gebieten: der Topologie und den dynamischen Systemen.**

Das Klischee, Mathematik sei kompliziert und praxisfern, trifft mit Sicherheit nicht auf alle Gebiete des Fachs zu. Doch wenn ein Bereich dieses Vorurteil verdient hat, ist es wohl die Topologie. Darum mag es überraschen, wenn sich jemand zunächst für eine Karriere in diesem Bereich entscheidet, sich dann aber nach einiger Zeit plötzlich den anwendungsnahen dynamischen Systemen zuwendet, mit denen sich das Wetter, biologisches Wachstum oder Planetenbahnen berechnen lassen.

Diesen ungewöhnlichen Weg hat der 1941 geborene US-Amerikaner Dennis Parnell Sullivan beschritten. Zunächst machte er von 1963 bis in die späten 1970er Jahre hinein beeindruckende Fortschritte im Bereich der Topologie. Nach dem Wechsel zu den dynamischen Systemen nutzte er dort geometrische Ansätze, wie er sie in seiner vorigen Forschung entwickelt hatte, und prägte damit auch dieses Gebiet maßgeblich. Für seine federführenden Beiträge in beiden so unterschiedlichen Bereichen hat ihm die Norwegische Akademie der Wissenschaften den diesjährigen Abelpreis verliehen. Die Ehrung wird seit 2003 vergeben und zählt – neben der

alle vier Jahre überreichten Fields-Medaille – als die höchste Auszeichnung der Mathematik.

Topologen gelten als die Minimalisten ihres Fachs. Das Gebiet entstand im 19. Jahrhundert aus der Geometrie. Dabei geht es ebenfalls um Figuren, nur ohne allzu viele Details: Zwei Gegenstände gelten als gleich, wenn man sie ohne Zerreißen oder Zusammenkleben ineinander umformen kann, etwa ein Donut und eine Kaffeetasse (beide besitzen ein Loch). In seiner Doktorarbeit widmete sich Sullivan direkt der Hauptaufgabe des Bereichs, dem Klassifizieren so genannter Mannigfaltigkeiten.

Denn in der Topologie verzichtet man auf Einzelheiten, um Objekte besser ordnen zu können. In manchen Fällen kommt es in der Mathematik nämlich nicht darauf an, die genaue Beschaffenheit einer Form zu kennen, sondern bloß ihre grobe Gestalt. Mannigfaltigkeiten sind dabei besonders angenehm, weil sie weder Ecken noch Kanten sowie keinen Anfang und kein Ende besitzen, wie eine Kugel. In zwei und drei Dimensionen kann man solche Gebilde einfach kategorisieren, denn dort lassen sie sich noch visualisieren.



**DENNIS PARNELL SULLIVAN**  
Der 1941 geborene US-amerikanische Mathematiker studierte anfangs Chemieingenieurwesen, wechselte dann jedoch das Fach.

Es gibt nur eine Art eindimensionale Mannigfaltigkeit, der Kreis. Alle anderen Linien oder Kurven haben entweder lose Enden oder können nahtlos zu einem Kreis umgeformt werden. In zwei Dimensionen wird es schon etwas spannender. Hier gibt es die Oberfläche einer Kugel, aber auch die eines Donuts, die eines Donuts mit zwei Löchern, mit drei Löchern und so

weiter. Der 3-D-Fall wird hingegen schwierig, denn man muss sich eine dreidimensionale Fläche in einem 4-D-Raum denken. Doch mit dem Beweis der »Poincaré-Vermutung« (was kein Loch hat, kann zu einer Kugel umgeformt werden) durch Grigori Perelman im Jahr 2003 hatte man auch dafür Antworten gefunden. Viele der Errungenschaften in niedrigen Dimensionen verdanken sich »chirurgischen« Methoden: Dabei schneidet man Objekte auseinander und klebt sie wieder zusammen, um mehr über sie zu erfahren.

### Operationen in hohen Dimensionen

Sullivan widmete sich in den 1960er Jahren den Dimensionen von fünf aufwärts. Diese stellen sich erstaunlicherweise als wesentlich einfacher zu studieren heraus als der vierdimensionale Fall. Das liegt daran, dass die zusätzlichen Dimensionen gewissermaßen mehr Platz bieten, um Mannigfaltigkeiten ineinander umzuwandeln – und somit ihre topologische Gleichheit zu zeigen. In seiner Doktorarbeit entwickelte der Preisträger chirurgische Methoden zur Abbildung hochdimensionaler Objekte aufeinander. »Seine Arbeit hat maßgeblich dazu beigetragen,

ein vollständiges Bild davon zu erhalten, welche Mannigfaltigkeiten es in fünf oder mehr Dimensionen gibt«, erklärt der britische Journalist Alex Bellos in der vom Abelpreis-Komitee herausgegebenen Erklärung.

In den folgenden Jahren bereicherte Sullivan das Gebiet, indem er Techniken entwickelte, um praktische Berechnungen an den abstrakten Gebilden durchzuführen. So wie sich eine Kurve häufig als Graph in einem Koordinatensystem geometrisch untersuchen lässt, kann man dem Graph auch eine Funktionsgleichung zuweisen. Diese erleichtert es häufig, Eigenschaften wie Schnittpunkte exakt zu bestimmen. Auf ähnliche Weise kann man algebraische Strukturen, etwa Gruppen, mit Mannigfaltigkeiten und anderen Figuren in Verbindung setzen. Sullivan schaffte es, die bisherigen Konzepte auf zusätzliche topologische Räume zu erweitern.

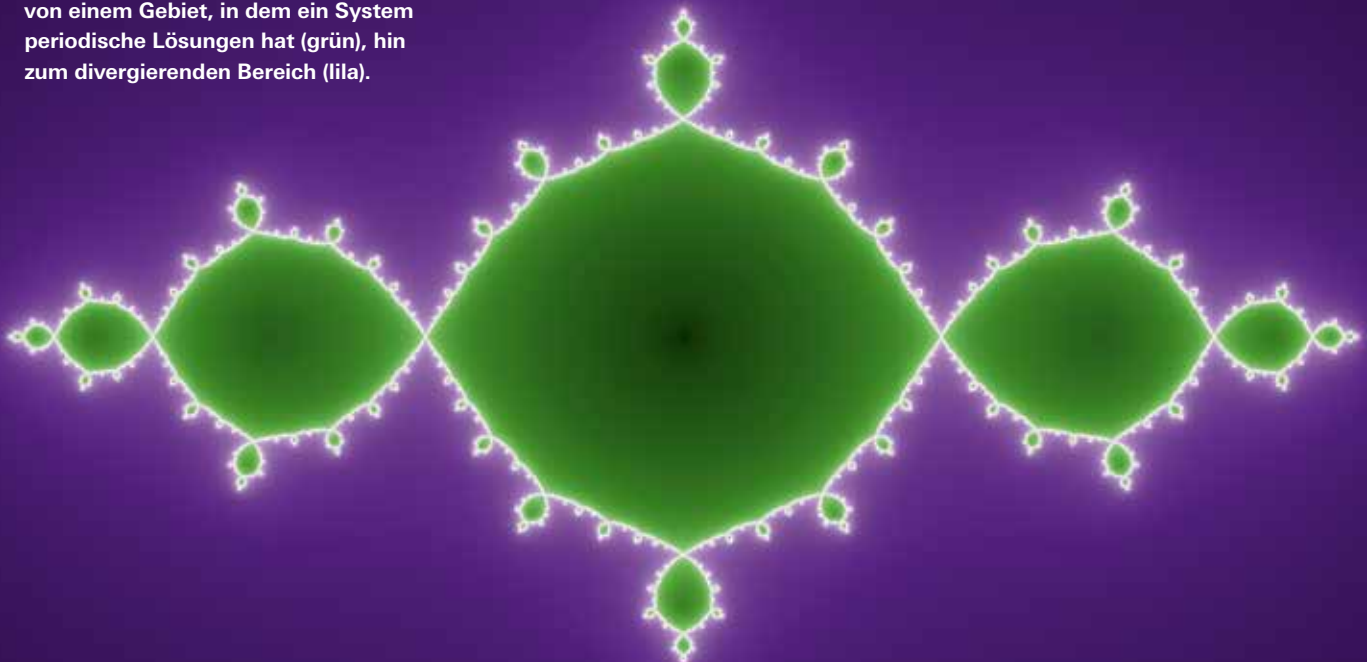
Mit leistungsfähigeren Computern erregte Ende der 1970er Jahre ein neues mathematisches Gebiet viel Aufmerksamkeit: die dynamischen Systeme. Dabei geht es darum, die Bewegung eines Punkts in einer geometrischen Umgebung zu untersuchen, etwa die Bahn eines Planeten.

Auch der Mathematiker fand Gefallen an dem Thema, ebenso wie die Öffentlichkeit, die den Begriff der damit verbundenen Chaostheorie aber bis heute häufig missinterpretiert.

Dynamische Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sich ihr Zustand zeitlich ändert. Ihr Verlauf, also die vollführten Bewegungen, hängt dabei vollständig von den Startwerten ab. Lässt man etwa einen Ball in einem Meter Höhe los, knallt er geradewegs auf die Erde. Besitzt er hingegen eine nach vorne gerichtete Anfangsgeschwindigkeit, wird er parabelförmig auf dem Boden auftreffen. Gerade das Wetter hängt empfindlich von den anfänglichen Parametern ab. Wenn diese nur ein wenig variieren, sieht das Endergebnis komplett anders aus. Das ist es, was Mathematiker als Chaos bezeichnen.

Phänomene wie das Wetter sind extrem komplizierte dynamische Systeme, weil sich dort unzählige Faktoren gegenseitig beeinflussen. Um das Fachgebiet zu untersuchen, kann man sich aber einfachen Beispielen zuwenden, denn auch sie besitzen schon spannende Eigenschaften, etwa das System, das durch die Gleichung  $f(x) = x^2 - 1$  entsteht. Man wählt einen

**JULIA-MENGEN** zeigen den Übergang von einem Gebiet, in dem ein System periodische Lösungen hat (grün), hin zum divergierenden Bereich (lila).



Startwert  $x_0$  aus und setzt diesen in die Funktion ein:  $f(x_0)$ . Das Ergebnis wird dann erneut als Eingabe genutzt:  $f(f(x_0))$ , und das wiederholt man immer wieder. Wenn  $x_0$  zum Beispiel 2 ist, wachsen die so entstehenden Werte stetig an. Startet man hingegen mit  $x_0 = 1$ , ergibt sich eine periodische Folge: 0, -1, 0, -1, 0, -1, ...

## Das Pendeln zieht sich durch

Sullivan widmete sich der Frage, wann ein System periodische Ergebnisse besitzt. Dafür nutzte er Methoden aus der Geometrie, die er auf die komplexe Zahlenebene anwendete – eine Art kartesisches Koordinatensystem, bei dem die y-Komponente Vielfache von Wurzeln aus negativen Zahlen darstellt. Damit gelang es ihm, eine aus den 1920er Jahren stammende Vermutung zu beweisen, die angibt, welche

Startpunkte zu periodischem Verhalten führen.

Anfangs pendelte Sullivan ständig zwischen Paris und New York, da er an Universitäten in beiden Städten arbeitete. In den späten 1990er Jahren nahm er schließlich eine Anstellung an der State University of New York an. Dort begann er sich wieder vermehrt für seine ursprüngliche Leidenschaft zu interessieren, die Topologie – und konnte erneut Erstaunliches zu dem Gebiet beitragen. Zum Beispiel definierte er zusammen mit seiner Kollegin und Ehefrau Moira Chas 1999 eine neue topologische Invariante. Dabei handelt es sich um eine charakteristische Größe (etwa eine Zahl, ein Polynom oder eine Matrix), die sich nicht ändert, wenn man eine Mannigfaltigkeit verformt. Das hilft beim Kategorisieren dieser Objekte, da topologisch

äquivalente Figuren zwangsweise die gleiche Invariante besitzen (umgekehrt ist das aber nicht der Fall).

Nun stellt sich die Frage, ob Sullivan dem periodischen Muster seines Lebens treu bleibt und sich in den kommenden Jahren nochmals den dynamischen Systemen zuwendet. An ungelösten Problemen mangelt es in dem Bereich jedenfalls nicht. ◀

**Manon Bischoff** ist theoretische Physikerin und Redakteurin bei »Spektrum«.

## QUELLEN

**Sullivan, D.:** Infinitesimal computations in topology. Publications Mathématiques de l'Institut des Hautes Études Scientifiques 47, 1977

**Sullivan, D.:** Quasiconformal Homeomorphisms and Dynamics I. Solution of the Fatou-Julia Problem on Wandering Domains. Annals of Mathematics 122, 1985

## CHEMIE KI BERECHNET MOLEKÜLE REALISTISCHER

**Ob für die Medikamentenentwicklung oder neue Materialien: Heute läuft nichts ohne Simulationen von Molekülen und deren Eigenschaften. Mit manchen Situationen haben gängige Algorithmen aber Probleme. Ein auf maschinellem Lernen basierender Ansatz bildet die Realität jetzt besser ab.**

► Wie schwierig ist es, exakt vorzuberechnen, wie zwei Stoffe miteinander chemisch reagieren? So schwierig, dass es selbst mit Supercomputern heute noch nicht gelingt. Denn hier geht es um quantenmechanische Kalkulationen, die auf der berühmten Schrödingergleichung beruhen. Damit lässt sich zum Beispiel ausrechnen, welche Energie ein Teilchen in einer bestimmten Umgebung besitzt – etwa die Energiezustände, die ein Elektron in einem Wasserstoffatom annehmen kann. Aus den Energiewerten lassen sich wiederum beispielsweise die Spektrallinien des Wasserstoffatoms genau berechnen.

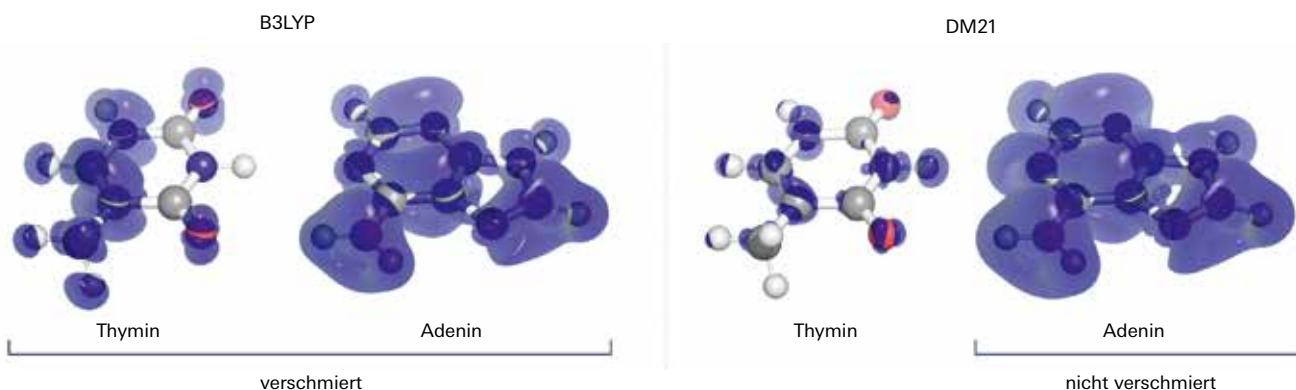
Obwohl die Gleichung allumfassend ist und sich mit ihr theoretisch die Energiewerte der Elektronen in jedem Molekül berechnen lassen, ist ihr

Nutzen begrenzt: Denn jedes Teilchen, das hinzukommt, wechselwirkt mit jedem anderen Teilchen. Dadurch werden die mathematischen Ausdrücke schnell unglaublich kompliziert, weshalb sich Atome, die komplexer sind als das Wasserstoffatom, nur noch näherungsweise berechnen lassen – also alle anderen. Bei Molekülen ist es ebenso schwierig: Nur für das einfachste denkbare Molekül  $H_2^+$  – bestehend aus zwei Wasserstoffatomen, die sich ein Elektron teilen – erhält man eine exakte Lösung. Sobald mehr als ein Elektron im System vorhanden ist, muss man die Rechnung bereits vereinfachen und erhält dementsprechend nur eine ungefähre Lösung.

Um dem Problem beizukommen, begannen Theoretiker bald, zahlreiche

ausgeklügelte Näherungen zu ersinnen. In Verbindung mit den immer leistungsfähigeren Computern gelang es Fachleuten in den folgenden Jahrzehnten damit zunehmend besser, Geometrien und andere Eigenschaften von Molekülen vorzuberechnen.

Doch in den 1960er Jahren stellten die Physiker Walter Kohn und Pierre Hohenberg derartige Berechnungen auf ganz neue Füße: Sie machten sie unabhängig von der Wellenfunktion der Elektronen, wie sie in der Schrödingergleichung auftritt. Stattdessen betrachteten die beiden Wissenschaftler die Elektronendichte, bildlich vorstellbar wie eine Flüssigkeit, die sich an manchen Stellen dichter, an manchen weniger dicht über das Molekül verteilt. Sie zeigten, dass die Energie eines Moleküls direkt von der



**DNA-BASENPAAR** Gängige Algorithmen verschmieren die Ladung (violett) eines ionisierten DNA-Basenpaares aus Adenin und Thymin über beide Moleküle (zum Beispiel B3LYP, links). Das neue Funktional DM21 gibt die Ladungsverteilung realistischer wieder (rechts).

Verteilung der Elektronendichte abhängt, und taufen ihren bahnbrechenden Ansatz Dichtefunktionaltheorie (DFT). Man müsste jetzt nur noch einen Algorithmus – mathematisch gesprochen ein Funktional – finden, der die Elektronendichteverteilung mit der Energie des Moleküls verknüpft.

**Suche nach der besten Näherung**  
Seither sind Physiker und Chemiker auf der Suche nach diesem ultimativen Funktional oder zumindest nach dessen bester Näherung. »Der größte Teil des Funktionals ist bekannt«, sagt Stefan Grimme, der an der Universität Bonn zur Dichtefunktionaltheorie forscht. »Wir reden über einen numerisch kleinen, aber sehr wichtigen Anteil, den es zu finden und optimieren gilt.« Letzterer nennt sich »Austausch- und Korrelationsfunktional« und beschreibt alle schwierigen und nichtklassischen Wechselwirkungen der Elektronen in einem Molekül nach den Regeln und Bedingungen der Quantenmechanik und für verschiedene Elektronendichten. Je mehr dieser Bedingungen ein Funktional erfüllt, desto genauer gibt es die Realität wieder und desto besser ist es geeignet, tatsächliche Energien zu berech-

nen und chemisch-physikalische Eigenschaften vorherzusagen. In den letzten Jahrzehnten haben die Fachleute immer bessere Funktionale erdacht, mit denen sich selbst große Moleküle ziemlich genau berechnen lassen. Allerdings braucht ein Funktional, das die Gegebenheiten genauer abbildet, auch mehr Rechenkapazität als eines, das weniger Bedingungen erfüllt.

Heute sind DFT-Rechnungen in den Naturwissenschaften weit verbreitet und laut dem Fachmagazin »Nature« eine der meistzitierten Methoden. Kein Wunder, bilden sie doch die Grundlage für die Entwicklung von Stoffen aller Art: Mit ihrer Hilfe sagen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Materialeigenschaften voraus, designen Materialien für Supraleiter, berechnen Geometrien höchst komplexer Moleküle und verifizieren theoretische Gedankenexperimente wie Reaktionswege und Zwischenprodukte. Auch Molekülspektren lassen sich anhand von DFT-Rechnungen vorhersagen oder überprüfen. Um auf der Suche nach neuen Medikamenten die vielversprechendsten Wirkstoffe zu finden, simulieren Fachleute vorab deren Molekülgeometrien und elektronische Strukturen und ermitteln darauf basierend die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Wirkstoff gut mit seinem Ziel wechselwirkt. Für seine Entdeckung, die die Naturwissenschaften so grundlegend beeinflusste, erhielt Walter Kohn 1998 den Nobelpreis für Chemie.

Doch selbst die besten heute bekannten Funktionale stoßen an Grenzen. Eine davon ist für Chemikerinnen

und Chemiker besonders ärgerlich: Die bisherigen Methoden »über-delokalisieren Elektronen«, wie es Grimme beschreibt. Sie verteilen die Elektronen also gleichmäßiger in einem Molekül, als es in der Realität der Fall ist. »Das war schon immer ein Problem in der DFT.« In der Praxis verzerrt dieses Manko die Elektronendichteverteilung von Molekülen und führt daher zu falschen Vorhersagen von Eigenschaften und Reaktionen. Anschaulich zeigt sich das bei der Simulation zweier Moleküle, bei denen die elektrische Ladung größtenteils auf der einen Seite konzentriert ist: Hier »verschmiert« das Modell die Elektronendichte oft anders als in der Realität zu sehr über beide Teile (siehe »DNA-Basenpaar«).

Als weitere Folge davon sind gängige Funktionale schlecht darin, Bindungsbrüche und neue Bindungsknüpfungen korrekt zu beschreiben. Genau das sind jedoch die Prozesse, die bei einer chemischen Reaktion ablaufen. Ein gängiges Funktional kann daher, vereinfacht gesagt, die Energien jedes an einer Reaktion beteiligten Stoffs vor und nach der Reaktion vorhersagen, aber deutlich schlechter ermitteln, welche Energie der kurzlebige Zwischenzustand hat, in dem die bisherige Bindung noch nicht völlig gebrochen und die neue noch nicht ganz geknüpft ist. Fachleute nennen ihn den Übergangszustand. Dessen Energie ist ausschlaggebend dafür, ob und wie schnell eine chemische Umwandlung abläuft. Und falls es verschiedene mögliche Übergangszustände gibt, ist deren Energie umso wichtiger zu kennen, denn nur dann kann man

voraussagen, welches Produkt bevorzugt gebildet wird und wie sich die Reaktion in die gewünschte Richtung lenken lässt.

Das zu Grunde liegende Problem ist ein wenig vertrackt. Um der Realität näherzukommen, muss man hier zunächst eine in der Praxis sehr unrealistische Annahme machen: Man muss sich mit gebrochenzahligen Ladungen beschäftigen.

Elektronen gibt es nur ganz oder gar nicht, und daher wird kein Molekül etwa eine halbe positive oder negative Ladung aufweisen. »Effektiv kann es in einem Molekül in einer bestimmten Bindungssituation aber so aussehen, als sei eine gebrochene Zahl von Elektronen lokal vorhanden«, erklärt es Grimme. Beispielsweise während einer chemischen Reaktion: Zu einem Zeitpunkt ist eine Bindung bereits teilweise geknüpft, die andere noch nicht ganz aufgelöst. Dass die heutigen Funktionale das nur schlecht abbilden können, führt zu besagten systematischen Fehlern: falsche Elektronendichteverteilungen und falsche Reaktionsvorhersagen.

Daher knöpfte sich das Team der Firma DeepMind jetzt explizit dieses Problem vor. Die exakte Energie eines Modellsystems mit gebrochenzahliger Elektronendichte mathematisch abzubilden sei schwierig, schreiben die Autorinnen und Autoren um James Kirkpatrick in ihrer Veröffentlichung. Weil sich der Zusammenhang jedoch einfach anhand von Beispielen zeigen ließe, sei die Aufgabe »perfekt geeignet für maschinelles Lernen«.

Die Entwickler legten ihrem System zunächst den Code eines gängigen Funktionals zu Grunde und konzentrierten sich auf den Austausch- und Korrelationsterm – jenen Teil, den es noch zu verbessern gilt. Rein formell sind für dessen Formulierung keine Grenzen gesetzt. »Sie sind relativ frei in der Wahl der Mathematik«, so Grimme.

Um ihr System die Beziehung zwischen Energie und Elektronendichte speziell bei Molekülen mit nicht ganzzahligen Elektronendichten lernen zu lassen, trainierten sie es mit 2235 Datensets. Gut die Hälfte davon umfasste

Prozesse wie Atomisierungen und Ionisierungen – also Vorgänge, bei denen ein Molekül in seine Einzelbestandteile zerlegt wird – und die dazugehörigen Elektronendichteverteilungen und Energien. Mit diesem Anschauungsmaterial lernte das System, eine Verbindung zwischen der Elektronendichteverteilung der Moleküle und deren Energie herzustellen. Die knappe andere Hälfte der Daten bestand aus errechneten Energiewerten für hypothetische einatomige Ionen mit gebrochenzahligen Ladungen und Spins.

### **Erstmals realistische Ladungsverteilung in einem DNA-Basenpaar**

Nach verschiedenen Verfeinerungen und Korrekturen testete die Forschungsgruppe, wie gut das neue Funktional, genannt DM21, ihm unbekannte Stoffe beschreiben konnte. Dabei konzentrierte sie sich auf Fälle, die bisherige Funktionale nicht gut abbilden können: die Ladungsverteilung in einem ionisierten DNA-Basenpaar, das Verhalten von Ketten aus Wasserstoffatomen sowie die Öffnung eines diradikalischen Rings.

Am Beispiel des Basenpaars Adenin und Thymin zeigt sich besonders anschaulich, welche Vorteile das vom Team um Kirkpatrick entwickelte Funktional bringt (siehe »DNA-Basenpaar«). Die beiden Basen sind über zwei Wasserstoffbrückenbindungen lose miteinander verbunden. Ist das Basenpaar einfach positiv geladen (ionisiert), suggerieren die bislang besten gängigen DFT-Funktionale, dass sich die Ladung gleichmäßig über beide Moleküle verteilt. Tatsächlich aber ist nur der Adenin-Teil positiv geladen. Wie man im Bild »Basenpaar« sieht, bildet das neue Funktional das erstmals realistisch ab.

Das liegt laut den Autoren daran, dass das System nicht ganzzahlige Elektronenspins und Ladungen in einer delokalisierten Situation viel besser beschreibt. Dieser grundlegende Unterschied hat jedoch noch weitere Auswirkungen, wie die Verfasser in ihrer Veröffentlichung an Beispielen zeigen: Zum einen ließen sich magnetische Eigenschaften von Stoffen besser abbilden, zum anderen sage der

Algorithmus das Brechen und Bilden von Bindungen korrekter voraus.

»Das neue Funktional löst die Problematik gut«, urteilt Grimme. Bei schwierigen Systemen, die bisher eine Herausforderung waren, schneide DM21 sehr gut ab. Revolutionieren wird es seiner Einschätzung nach die Chemie noch nicht. Denn Prüfstein für ein neues Funktional sei immer, wie es in der Breite mit gängigen Methoden konkurrieren könne, und hier rangiere es »vergleichbar« mit der derzeit meistverwendeten Software.

Grimme hat mit seiner Forschungsgruppe ein Benchmark-Set entwickelt, das die Energien und Elektronendichteverteilungen für insgesamt rund 1500 Reaktionen aus 55 Reaktionstypen enthält. Es ist heute eines der Standardsets, mit denen Forschungsgruppen ihre neuen Funktionale testen. In einem Teilsatz davon, das aus hypothetischen Molekülen aus zufällig zusammengewürfelten Elementen besteht, habe die neue KI beeindruckend abgeschnitten, urteilt der Experte. Doch die Performance über das gesamte Set sei im Mittel nur so gut wie die besten derzeit verfügbaren Methoden.

Um einen echten Durchbruch darzustellen, müsse ein Funktional entweder deutlich besser sein als die gängigen – oder viel schneller zu berechnen. Denn DM21 ist so kompliziert, dass es noch um ein Vielfaches länger braucht als gängige Standards, um ein Molekül zu berechnen. Ob die Entwickler dieses Rechenzeitproblem mit maschinellem Lernen beseitigen können, wird sich noch zeigen. ◀

**Verena Tang** ist Chemikerin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

### QUELLEN

**Goerigk, L. et al.:** A look at the density functional theory zoo with the advanced GMTKN55 database for general main group thermochemistry, kinetics and noncovalent interactions. *Physical Chemistry Chemical Physics* 48, 2017

**Kirkpatrick, J. et al.:** Pushing the frontiers of density functionals by solving the fractional electron problem. *Science* 374, 2021

**Van Noorden, R. et al.:** The top 100 papers. *Nature* 514, 2014



# SPRINGER'S EINWÜRFE ... DENN ES FÜHLT WIE DU DEN SCHMERZ

**Ist Tierwohl bloß eine sentimentale Idee? Haben nicht-menschliche Organismen überhaupt Gefühle?**

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

» [spektrum.de/artikel/2008756](https://spektrum.de/artikel/2008756)

Seit jeher verwenden wir Tiere als Nahrung. Sie werden gejagt oder gezüchtet, in Ställen oder Aquakulturen gehalten, in Behältern weithin transportiert und schließlich oft wie am Fließband vom Leben zum Tod befördert. Damit wir sie uns genussvoll schmecken lassen, sollen die Wesen zumindest nicht unnötig leiden. Tierschutz und Tierwohl liegen uns neuerdings am Herzen.

Aber haben Vierbeiner überhaupt Gefühle – von Fischen ganz zu schweigen? Die christlichen Religionen sprechen nur uns Menschen eine sensible Seele zu, und der Aufklärungsphilosoph Descartes sah im Tier bloß einen gefühllosen Automaten. Also darf man Wild und Huhn, Kuh und Schaf guten Gewissens verzehren?

Der darwinsche Evolutionsgedanke stellte die säuberliche Trennung in Frage. Im Stammbaum des Lebens sind Affe und Mensch engste Verwandte, und sogar in einen evolutionär weiter von uns entfernten Organismus wie Pferd, Hund oder Katze können wir uns gut hineindenken. Ist das nun sentimentale Vermenschlichung, oder müssen wir Tieren allen Ernstes Emotionen zubilligen?

Der prominente Primatenforscher Frans de Waal von der Emory University in Atlanta im US-Bundesstaat Georgia hat in zahlreichen Studien den Nachweis geführt, dass in den Menschenaffen Charakteristika angelegt sind, die wir traditionell ausschließlich für uns reserviert haben – nicht zuletzt die Einfühlung in Artgenossen. Nun hat er zusammen mit der Philosophin Kristin Andrews von der York University im kanadischen Toronto diese Argumentation sogar auf Wirbellose und Insekten auszudehnen versucht (*Science* 375, S. 1351–1352, 2022).

Können etwa Fische Schmerz empfinden? Nein, dachte man zunächst: Sie zucken vermeintlich nur reflexhaft von der Quelle des unangenehmen Reizes zurück, so wie wir von der heißen Herdplatte. Doch dann entdeckte man, dass Fische von der Begegnung

mit negativen Stimuli lernen, sie von vornherein zu meiden. Das heißt, sie erinnern sich.

Ähnliches gilt für das riesige Reich der Gliederfüßer. Krabben machen einen Bogen um Orte, an denen sie zuvor einen Stromschlag erhalten haben. Sie verhalten sich, als fürchteten sie erneute Pein.

Man mag einwenden: Über derlei innere Zustände weiß ich doch gar nichts, solange sie nicht sprachlich ausgedrückt werden. Mit diesem Argument hat man bis in die 1980er Jahre sogar Kleinkindern, da sie noch nicht reden konnten, das Schmerzempfinden abgesprochen und an ihnen ohne Anästhesie chirurgische Eingriffe vorgenommen.

Unterdessen wird die evolutionäre Nähe von Tier und Mensch zur Erforschung beider Innenleben genutzt. Auf Grund der ähnlichen Gehirne und Nervensysteme dienen Tiermodelle längst dazu, die physiologischen Prozesse zu analysieren, die bei Gefühlen wie Furcht, Wut, Ekel und Anziehung im Spiel sind. Beispielsweise verläuft die Aktivierung der Amygdala durch schreckliche Erlebnisse bei Ratten und Menschen analog. Und gestresste Honigbienen zeigen ähnliche Veränderungen der Neurotransmitter wie geängstigte Versuchspersonen.

Sobald wir anerkennen, dass unsere tierischen Verwandten ein mehr oder weniger ähnliches Gefühlsleben besitzen, hat das moralische Konsequenzen, betonen de Waal und Andrews. Jemand wie ich würde zwar weiterhin ungern ganz auf Fisch und Fleisch verzichten, aber dennoch wirksame Auflagen für Tierschutz und Tierwohl befürworten.

Hoffentlich ist es wenigstens bald verboten, Hummer lebend ins kochende Wasser zu werfen. Seit ich gelesen habe, wie der Autor David Foster Wallace die mehrtägige Fressorgie beim alljährlichen Lobster Festival im US-Bundesstaat Maine beschrieben hat, ist mir der Appetit auf derart zubereitete Krustentiere gründlich vergangen.

# ÖKOLOGIE

## GEFAHR AUS DEM WASSER


**Indigene Gemeinschaften in Alaska bauen wissenschaftliche Netzwerke auf, um Meerestiere auf Schadstoffbelastung zu prüfen. Denn weil in ihrem Lebensraum immer häufiger toxische Algenblüten auftreten, wächst das Risiko, sich an Muscheln oder Fischen zu vergiften.**



**Karen Pinchin**  
arbeitet als Journalistin  
in Halifax, Kanada.

» [spektrum.de/artikel/2008759](https://spektrum.de/artikel/2008759)





**STANDFEST** Miesmuscheln haften an Steinen entlang der Gezeitenzone bei Seldovia, Alaska.

## AUF EINEN BLICK TÜCKISCHES GIFT

- 1** Manche Algenspezies, die im Meer leben, setzen tödliche Toxine frei.
- 2** Infolge des Klimawandels vermehren sich solche Algen vor Alaskas Küsten immer öfter explosionsartig und vergiften dabei unzählige Wassertiere.
- 3** Das bedroht Indigene, die dort leben und sich aus dem Meer ernähren. Sie versuchen deshalb, eine Überwachungsinfrastruktur aufzubauen, um die Risiken zu minimieren.

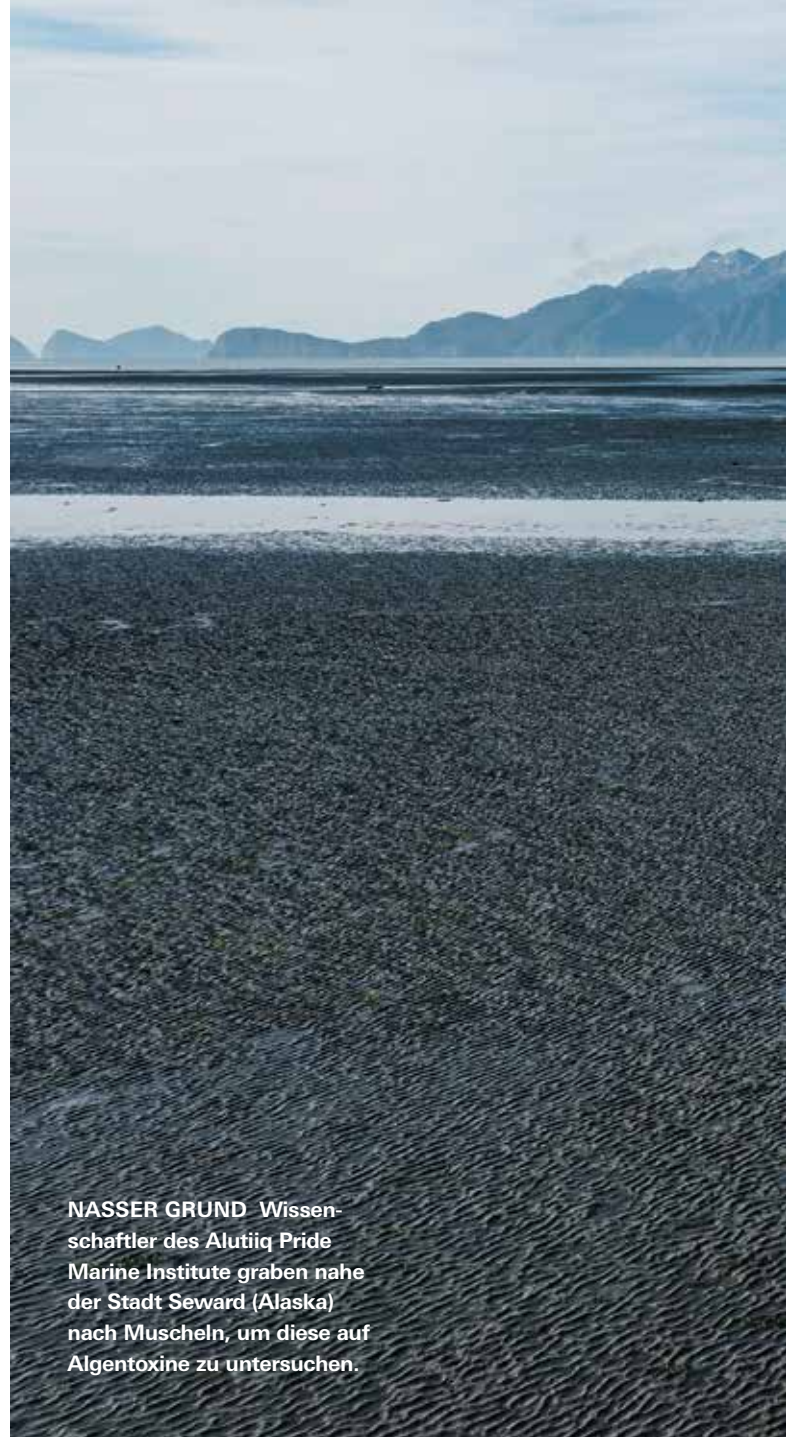
► An einem kühlen Augustmorgen in Seldovia, Alaska, steht Stephen Payton am Rand des Kais und zieht ein feines, kegelförmiges Netz mit einer Stange durchs Meerwasser. Schreiend kreisen die Möwen über uns in der dunstigen Luft, während der 30-Jährige verfolgt, wie seine Fangvorrichtung unter der Oberfläche dahingleitet. Am schmalen Ende des Maschenwerks ist eine kleine Plastikflasche angebracht, in der sich die aus dem Wasser gesiebten Partikel sammeln. Nach einer Weile holt Payton das Netz nach oben, löst die Flasche ab, trüpfelt ein jodhaltiges Konservierungsmittel hinein, beschriftet sie und übergibt sie mir. Wir laufen zu seinem weißen Truck, steigen ein und fahren eine Meile weiter zur Schotterlandebahn von Seldovia, wo ich ein sechssitziges Propellerflugzeug besteige. Denn jetzt muss es schnell gehen: Die Lebewesen, die wir in der Flasche gefangen haben, werden binnen weniger Stunden verenden.

15 Minuten später lande ich in der Stadt Homer auf der gegenüberliegenden Seite der Kachemak Bay, einer 64 Kilometer langen Bucht im Bezirk Kenai Peninsula Borough. Dort empfängt mich die Ökologin Jasmine Mauer von der Forschungseinrichtung Kachemak Bay Research Reserve. Mauer, die gegenüber des kleinen Flughafens arbeitet, führt mich in ihr Büro und setzt sich an den Labortisch. Sie lässt ein paar Tropfen aus der Plastikflasche auf einen Objektträger fallen und untersucht sie mit einem Mikroskop. Ich schaue ihr über die Schulter, während sie die Probe auf Anzeichen giftiger Algen hin durchforstet. Wenige Minuten später rollt sie ihren Stuhl zurück: Das Wasser scheint sauber zu sein.

### Gefahr, die im Meer lauert

Stephen Payton, der mir die Plastikflasche mitgegeben hat, stammt von den Aleuten ab – Indigenen, die auf den gleichnamigen Inseln zwischen Nordamerika und Asien leben. Seine Vorfahren haben schon vor Jahrhunderten in den Gewässern Alaskas gefischt. Er arbeitet als Umweltbeauftragter des Seldovia Village Tribe, eines staatlich anerkannten Volksstamms amerikanischer Ureinwohner. Ihr Wohnort Seldovia liegt im südlichen Teil der Kenai-Halbinsel und lässt sich nur per Schiff oder Flugzeug erreichen, da er nicht ans Straßennetz angebunden ist. An den Wochenenden nimmt Payton seine drei kleinen Kinder oft zum Fischen und Muschelsammeln mit. Die Meerestiere, die sie fangen, stellen einen bedeutenden Teil ihres Speiseplans; Fachleute bezeichnen diese Art der Eigenversorgung als »Subsistenzwirtschaft«. Sie ist bei den indigenen Aleuten von alters her üblich. Doch seit einiger Zeit wirft sie immer größere Probleme auf. Payton fürchtet sich vor einer wachsenden Gefahr, die im Meerwasser lauert: giftige Algen. »Je mehr ich darüber weiß, umso unwohler fühle ich mich, wenn ich da draußen Muscheln sammle«, sagt er.

Viele Indigene vermeiden es, während der Sommermonate marine Schalenweichtiere zu fangen. Denn in der warmen Saison treten toxische Algenblüten (HAB, von englisch: harmful algal blooms) gehäuft auf. Dann vermehren sich massenhaft Algen, die Gifte freisetzen – und die Schadstoffe reichern sich in diversen Meerestieren an.



**NASSER GRUND** Wissenschaftler des Alutiiq Pride Marine Institute graben nahe der Stadt Seward (Alaska) nach Muscheln, um diese auf Algtoxine zu untersuchen.

Trotzdem gibt es Anwohner, die das ganze Jahr über Ebbephasen nutzen, um sich die Stiefel anzuziehen und im Schlamm nach Muscheln zu suchen. Sie entdecken die Tiere anhand kleiner Bläschen, die sich im Matsch bilden. »Ich kenne eine Menge Leute, die das während der Sommermonate tun«, sagt Payton. »Ich würde das niemals machen.«

Die nördlichen Küstenregionen Alaskas werden immer öfter von toxischen Algenblüten heimgesucht. Mehrere Monate des Jahres machen sie so die Muschelernte zu einem Gesundheitsrisiko. Untersuchungen belegen, dass zwischen 1998 und 2018 die jährliche Zahl der Algenblüten im Arktischen Ozean um mindestens 50 Prozent gestiegen ist. Die Häufigkeit und Intensität dieser Ereignisse dürften künftig weiter zunehmen, da sich die Gewässer der nörd-



KELLY YODAN

lichen Breitengrade erwärmen, was die massenhafte Vermehrung von Planktonorganismen begünstigt.

Die größte Bedrohung geht laut Payton von einem Winzling namens *Alexandrium catenella* aus, einem so genannten Dinoflagellaten (ein Einzeller mit fadenähnlichen Geißeln, die er zum Schwimmen benutzt). Vermehrt sich *A. catenella* explosionsartig während einer Algenblüte, produziert er ein geschmack- und geruchloses Neurotoxin, das 1000-mal giftiger ist als der chemische Kampfstoff Sarin. Die Substanz reichert sich in Muscheln an. Deren Verzehr ruft beim Menschen dann Vergiftungserscheinungen hervor, die unter der Bezeichnung PSP (paralytic shellfish poisoning, paralytische Schalentiervergiftung) bekannt sind. Zu den Symptomen zählen: Kribbelgefühl in den Lippen und in der Zunge, Taubheit und

Kontrollverlust in Armen und Beinen, Lähmungserscheinungen im Brust- und Unterleibsbereich. Mitunter ist die aufgenommene Toxinmenge so groß, dass ohne künstliche Beatmung binnen einer halben Stunde der Tod eintritt.

Vor einigen Jahren wäre eine Bewohnerin Seldovias fast gestorben, nachdem sie eine kontaminierte Muschel gegessen hatte. Sie leidet noch heute unter Gedächtnis ausfällen. Ihr Ehemann wusste die Symptome glücklicherweise richtig zu deuten, setzte seine Gattin ins Auto und raste mit ihr zu einer Klinik in Homer, wo es ein Bett mit Beatmungsgerät gibt. Der Fall eines Vietnamesen, der auf der Insel Unalaska arbeitete, verlief im Jahr 2021 weniger glimpflich: Der Mann starb während des Transports zum Krankenhaus, nachdem er auf einer Party eine Hand voll Miesmuscheln und eine Meeresschnecke verzehrt hatte.

Trotz solcher Fälle sammeln tausende Menschen – Indigene und Nichtindigene – jedes Jahr zahllose Muscheln und essen sie. Rund 15000 Tonnen Wildfleisch, Fisch und andere Meereslebewesen werden jährlich in Alaskas Subsistenzregionen erbeutet, das sind etwa 125 Kilogramm pro Person. In abgelegenen Gemeinden machen Meeressäuger, Fische, Vögel und Meeresfrüchte bis zu drei Viertel der selbst eingebrachten Nahrung aus.

In der Gezeitenzone zu jagen, hält überliefertes Wissen und kulturelle Eigenheiten lebendig. »Bei Ebbe ist der Tisch gedeckt«, lautet ein traditionelles Sprichwort, das auf das große Nahrungsangebot des Watts anspielt: Muscheln, Seeigel, Krebse, Seegurken, Schnecken oder Kopffüßer. Fachleute nehmen an, dass sich in den meisten dieser Tiere Giftstoffe anreichern können, die aus Algenblüten stammen.

### Küstenregionen unter Aufsicht

In manchen US-Küstenstaaten kontrollieren Forscherinnen und Forscher die Strände regelmäßig, um schon die ersten Anzeichen toxischer Algenblüten zu erkennen. Im Bundesstaat Washington überwachen autonome Schwimmersensoren 31 Standorte und übermitteln ihre Messdaten an Wissenschaftler und indigene Volksstämme. Kalifornien hat ein Beobachtungs- und Warnsystem eingerichtet; dabei beprobt die Landesbehörde für Öffentliche Gesundheit die küstennahen Gewässer und führt die so ermittelten Messwerte mit Giftstoffdaten zusammen, die an universitären Einrichtungen erhoben werden. In Maine sammeln geschulte Freiwillige vielerorts Wasserproben und senden sie zu Analyse Zwecken der Landesbehörde für marine Ressourcen zu. Floridas Fisch- und Wildtier-Kommission wiederum lässt die Küstengewässer wöchentlich beproben und betreibt sowohl eine Website als auch eine Hotline mit tagesaktuellen Warnungen vor Algenblüten. Laut einer Studie brachten Selbstversorger an der US-Westküste zwischen 1990 und 2014 eine Fangmenge an Meerestieren ein, die 220 Millionen Mahlzeiten entspricht. Viele Menschen dort vertrauen offensichtlich den staatlich geförderten Überwachungsprogrammen.

Vergleichbare Maßnahmen gibt es in Alaska nicht, obwohl toxische Algenblüten hier infolge des Klimawandels immer häufiger auftreten. Die Regierung des US-Bundesstaats hat es für unmöglich erklärt, die Giftstoffbelastung in Schalenweichtieren zu überwachen, von denen sich die örtlichen Selbstversorger ernähren. Die Küstenregionen seien schlicht zu groß dafür, heißt es von behördlicher Seite. Das führe dazu, dass Alaska »der einzige Bundesstaat ist, wo Menschen nach wie vor an toxischen Algenblüten sterben«, wie es Steve Kibler ausdrückt, Algenforscher und Meereskundler an der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Diese Sicherheitslücke versuchen die betroffenen indigenen Gemeinschaften – einschließlich jener in Seldovia – jetzt mittels Eigeninitiative zu schließen. Sie erheben Messdaten, bauen Überwachungsnetzwerke auf und holen den Rat von Giftstoffexperten ein, die oft an weit entfernten Einrichtungen arbeiten. Die Indigenen investieren in eine Testinfrastruktur, die auf ihren Ortskenntnissen



**LEBEN AN DER SEE** Der Umweltbeauftragte des alaskischen Volksstamms Seldovia Village Tribe, Stephen Payton, nimmt Proben aus dem Meer (links). Sein Onkel Michael Opheim, Leiter der Umweltschutzaktivitäten dieses Volksstamms, sucht zusammen mit Payton und zwei von dessen Söhnen nach Muscheln für das Abendessen (rechts).

und auf innovativer Wissenschaft beruht. Dabei überwinden sie geografische und logistische Hürden, indem sie Proben sammeln und über tausende Meilen versenden, um sie analysieren zu lassen. Mit diesem leidenschaftlichen Einsatz demonstrieren sie ihre wachsende Souveränität im Umgang mit traditionellen Ressourcen. Trotz zunehmender Gefährdung erreichen sie so eine höhere Nahrungsmittelsicherheit und zeigen, wie sich lokale Gemeinschaften gegen bedrohliche Umweltrisiken behaupten können.

Das Phytoplankton, zu dem die zahlreichen Algenarten zählen, dient vielen Meeresorganismen als Nahrung. Es umfasst vorwiegend einzellige Lebewesen in einer ungeheuren Vielfalt an Arten, Farben und Formen. Wenn genügend Licht, Wärme und Nährstoffe vorhanden sind – ob aus natürlichen Quellen wie Schmelzwasser von Gletschern, ob aus menschengemachten Abwässern etwa der

Landwirtschaft –, vermehren sich Algen explosionsartig und bringen dabei so genannte Blüten hervor. Der Ozean nimmt dann oft schillernde Blau-, Rot-, Grün- oder Brauntöne an, was mitunter sogar aus dem Weltall zu sehen ist. Geht das Nährstoffangebot wieder zurück, entwickeln die Algen spezielle Dauerformen wie die so genannten Zysten, die auf den Meeresboden sinken. Dort verharren sie in einem Ruhezustand, bis die Umstände es ihnen erneut erlauben, sich zu vermehren.

Lediglich etwa 250 der rund 5000 bekannten Algenspezies produzieren Toxine oder lagern sich zu erstickenden, großflächigen Matten zusammen – Eigenschaften, die eine gefährliche von einer harmlosen Blüte unterscheiden. In den drei Jahrzehnten seit Beginn der 1990er Jahre wurden weltweit etwa 10 000 toxische Algenblüten registriert. Mancherorts treten diese Ereignisse immer öfter auf, in anderen Regionen wiederum sinkt ihre Häufigkeit. Die dabei freigesetzten Toxine haben seit den 1980er Jahren tausende Menschen vergiftet und hunderte getötet, wobei die Philippinen die meisten Todesfälle verzeichneten.

Entlang der russischen Kamtschatka-Küste hat eine Algenblüte im Jahr 2020 schätzungsweise 95 Prozent der Fische, Tintenfische, Seesterne und Seegurken vernichtet. Vermutlich war sie auch die Ursache zahlreicher Fälle von Erbrechen, Fieber und Hornhautverätzung, die bei Surfern auftraten. In den USA haben toxische Algen laut der

NOAA gewaltige wirtschaftliche Schäden angerichtet, die das Fischereiwesen und den Tourismus betreffen und sich auf mehr als eine Milliarde US-Dollar summieren. Wieder und wieder verursachen sie »Rote Tiden« (Rötungen des Meerwassers) entlang Floridas Golfküste: Der massenhafte Vermehrung des einzelligen Dinoflagellaten *Karenia brevis* fallen dabei zahllose Fische und Seekühe zum Opfer, die an den Stränden verwesen.

### Eine tickende Zeitbombe

Die Gefahr kann sogar nach einer Algenblüte noch anhalten. Im Oktober 2021 berichteten Forscher um Donald M. Anderson von der Woods Hole Oceanographic Institution, dass sich auf dem Grund der Tschuktschensee (eines Randgebiets des Nordpolarmeers) eine riesige Ansammlung von Zysten des Dinoflagellaten *Alexandrium catenella* befände. *A. catenella* produziert das Nervengift Saxitoxin, das bereits in einer Menge von 0,5 Milligramm tödlich wirken kann. Das kalte Wasser in der Region sorgt dafür, dass die Dauerformen des Einzellers bis zu 100 Jahre überleben. Angeschwemmt von südlichen Strömungen, häufen sie sich in der Tschuktschensee an, während die Temperaturen dort infolge des Klimawandels steigen – und immer öfter Werte erreichen, bei denen eine explosionsartige Vermehrung einsetzt. Das sei eine tickende Zeitbombe vor den russischen und amerikanischen Küsten



einschließlich jener Alaskas, betont Anderson, der sich seit mehr als 40 Jahren mit toxischen Algen beschäftigt.

Planktonorganismen, die potenziell tödliche Giftstoffe produzieren, driften ständig nordwärts entlang von Alaskas großteils unkontrollierten Küsten. Die US-Medien berichten kaum darüber. Zwar thematisieren sie das Problem der toxischen Blüten, richten ihr Augenmerk hier aber auf den Westen, den Osten und die Golfküste der USA. Dabei sei Alaska deutlich stärker betroffen, betont Steve Kibler von der NOAA.

Dass die Regierung des Bundesstaats es für nicht machbar hält, Schalenweichtiere flächendeckend auf Giftstoffbelastung zu kontrollieren, hat mit den Größenverhältnissen des Landes zu tun: Alaskas Küsten sind in Summe länger als die aller restlichen US-Bundesstaaten zusammengenommen. Wenn ich mir die Gegend aus dem Flugzeugfenster ansah, war ich stets aufs Neue verblüfft von all den Fjorden, Buchten, Inseln und Gestaden, die sich schier endlos hinziehen. Selbst die härtesten Fürstreiter landesweiter Überwachungsprogramme räumen ein, dass Maßnahmen, die sich in anderen Bundesstaaten als effektiv erweisen, in Alaska nicht funktionieren. Mit Sensoren, die im Wasser treiben, lässt sich nicht genügend Fläche abdecken. Entnommene Proben aus entlegenen Gemeinden in zentrale Untersuchungszentren zu transportieren, ist kompliziert, zeitaufwändig, teuer und fehleranfällig. Zudem können sogar Schalenweichtiere, die am selben Strand zur gleichen Zeit lediglich einige Meter voneinander entfernt eingesammelt wurden, stark abweichende Toxingehalte aufweisen. Obendrein unterscheiden sich die

Spezies darin, wie schnell sie Schadstoffe aufnehmen beziehungsweise abbauen. Die langsam heranwachsenden und schmackhaften Buttermuscheln bleiben mitunter über Jahre hinweg giftig. Miesmuscheln dagegen verwandeln sich binnen einer Woche von tödlich in harmlos und umgekehrt.

Alaskas Regierung subventioniert Überwachungsprogramme für Austern und Königsmuscheln, deren industrieller Anbau kommerziell lukrativ ist. Sie fördert aber keine Kontrollmaßnahmen für Schalenweichtiere, von denen sich indigene Selbstversorger ernähren. Ein solcher Test kostet zirka 125 US-Dollar pro Probe und nimmt insgesamt zwei Wochen in Anspruch. Eine Zeitspanne, die für Betreiber einer industriellen Aquakultur mit gekühlten Lagerhäusern zumutbar ist, für Selbstversorger hingegen nicht zur Debatte steht. Geerntete Muscheln verderben in dieser Frist beziehungsweise können, wenn sie entsprechend lange im Tidenwasser gehalten werden, derweil neue Giftstoffe aufnehmen. Die Regierung Alaskas vertritt eine Position, die letztlich darauf hinausläuft, es gebe schlicht keine sichere Methode für die Eigenversorgung mit Schalenweichtieren.

#### **Drohender kultureller Verlust**

Diese Haltung sei inakzeptabel, sagt Karen Pletnikoff, zuständig für Umwelt- und Sicherheitsfragen bei der Aleutian Pribilof Islands Association. Der Verband fördert die Selbstversorgung und Unabhängigkeit der Unangan, wie sich die Ureinwohner der Aleuten selbst nennen. Muscheln zu sammeln, sei für die Unangan aus sozioöko-





**VORSORGE** Stephen Payton und seine Familie legen schmale Rinnen am Strand an und setzen kleine Muscheln darin aus, um später die ausgewachsenen Exemplare zu ernten. Die Schalenweichtiere stellen einen wichtigen Teil ihres Speiseplans dar.

nomischen Gründen und für die Eigenversorgung wichtig, so Pletnikoff. Jene Ernährungsweise aufgeben zu müssen, einschließlich des damit verbundenen tradierten Wissens, wäre ein großer Verlust für die Menschen.

Auch die Bewohner Seldovias möchten sicherstellen, »dass das, was wir als Kinder hatten, ebenso unseren Kindern und Enkeln zugutekommt«, betont Michael Opheim, der Onkel von Stephen Payton. Als Leiter der Umweltschutzaktivitäten des Seldovia Village Tribe ist er zugleich Paytons Chef.

Opheim hat mich zu einem sandigen Strand mitgenommen, an dem seine Familie von alters her nach Muscheln gräbt. Er erzählt mir, wie er in den 1970er Jahren in Seldovia aufwuchs – und wie er als Kind mit seiner Schwester darum wetteiferte, wer den ersten Happen bekäme, wenn der Vater von den gesammelten Buttermuscheln die Schalen entfernt hatte. Die Familie, entsinnt er sich, habe die Weichtiere damals eimerweise geerntet. Dass er Angst vor einer Vergiftung gehabt hätte, ist ihm nicht im Gedächtnis. Heute dagegen treibt ihn die ständige Sorge um, eine einzige verseuchte Muschel könnte einen Verwandten oder einen Freund töten.

Vor einigen Jahren ist Opheim dem Alaska Harmful Algal Bloom Network beigetreten, einem Verband, den Forscher, Regierungsvertreter und Sachverständige für indigene Kultur 2017 ins Leben gerufen haben. Sie alle waren frustriert davon, wie schlecht die Datenlage zu toxischen Algenblüten ist. Die Gemeinde Seldovia stellte Mittel bereit, um dort eine Überwachungsinfrastruktur aufzubauen, Proben zu sammeln und an kooperierende Forscher zu senden.

Einer dieser Kooperationspartner ist Bruce Wright, Meereskundler und ehemaliger wissenschaftlicher Regierungsberater, der die Interessen des Knik-Stamms vertritt. Er arbeitet im Umland von Anchorage, der größten Stadt Alaskas. Schon in den 1990er Jahren hat Wright begonnen, Schalenweichtiere mit behördlicher Unterstützung auf Giftstoffbelastung zu testen – damals mit Blick darauf, warum es immer wieder zu Massensterben bei Seevögeln und Sandaalen kommt. Heute bietet der Forscher entlegenen Gemeinschaften an, entsprechende Analysen in seinem staatlichen Labor durchzuführen; die Kosten erstattet ihm der Knik-Stamm. »Die Ureinwohner ernähren sich weiterhin von Schalenweichtieren«, sagt Wright, der selbst keine indigenen Vorfahren hat. »Ich versuche sicherzustellen, dass sie das gefahrlos tun können.«

Ich treffe Wright in der Behörde für Umweltschutz in Anchorage. Er führt mich in sein Labor – die einzige Einrichtung in Alaska, die von staatlicher Seite dafür zugelassen ist, Schalenweichtiere für den menschlichen Verzehr zu testen. Die meisten Analysen dienen der Qualitätssiche-

rung in der industriellen Austern- und Königsmuschelproduktion. Wir begegnen einem Assistenten, der drei Mäusen einen Brei aus gekochtem Austernfleisch verabreicht hat und nun abwartet, ob die Tiere daran verenden. Manchmal sterben die Nager dann binnen Sekunden, doch dieses Mal überleben sie.

Die Einwohner Seldovias kooperieren noch mit weiteren erfahrenen Fachleuten. Während einer der monatlich stattfindenden Telekonferenzen des Netzwerks äußert sich Kathi Lefebvre, Biologin und Expertin für toxische Algenblüten, die für die NOAA arbeitet. Lefebvre stellt eine mehrjährige Forschungsstudie vor, in der sie untersucht, wie sich Giftstoffe in der arktischen Nahrungskette verbreiten. Als das Meeting beendet ist, schreibt Opheim ihr eine Mail, um anzufragen, ob er ihr Proben zwecks Analyse zusenden könne.

Lefebvre zeigt sofort Interesse. Sie schlägt Opheim vor, einige Dutzend Heringe zu fangen und ihr zu schicken, damit sie die Ursache eines kürzlich aufgetretenen Massensterbens dieser Fische klären könne. Opheim beauftragt seinen Neffen Payton, was der, befugt durch seine Selbstversorgerlizenz, umgehend erledigt. Payton steckt die gefangenen Heringe in verschließbare Plastiksäcke, friert sie in seiner Tiefkühltruhe ein und lässt sie Lefebvre zukommen – ein kompliziertes Unterfangen, bei dem die eisgekühlte Fracht mehrmals das Flugzeug und den Kurier wechseln muss. Die Heringe liegen noch heute in Lefebvres Gefrierschrank, weil es wegen der Corona-beschränkungen nicht möglich war, sie zeitnah zu untersuchen. Sobald sich die Gelegenheit ergibt, wird die Biologin die Fische pürieren, den Fleischbrei zentrifugieren und die dabei gewonnene Körperflüssigkeit auf Toxine testen.

Schon 1998 wurde Lefebvre auf das Problem der toxischen Algenblüten aufmerksam. Sie erkannte, dass es einen Zusammenhang gibt zwischen dem Tod hunderter Kalifornischer Seelöwen und Kieselalgen der Gattung *Pseudo-nitzschia*, die Domoinsäure absondern. Die giftige Substanz, bekannt auch unter dem Namen »amnesic shellfish poison« (ASP), verursacht Übelkeit, Krämpfe, Durchfall, Atembeschwerden, Gedächtnisverlust und Hirnschäden. In schweren Fällen führt ihre Einnahme zum Tod. Ähnlich wie die bereits erwähnten PSP-Toxine ist dieses Gift geschmack- und geruchlos und lässt sich durch Kochen des damit kontaminierten Fleisches nicht neutralisieren.

### Teamarbeit über riesige Distanzen hinweg

*Pseudo-nitzschia* kommt in den Gewässern rund um Seldovia nachweislich vor, hat dort aber noch keine Blüte hervorgebracht – bis jetzt. Mit Sorge schaut Lefebvre auf die Wassertemperaturen, die infolge des Klimawandels steigen. »Die Umwelt verändert sich dermaßen drastisch, dass das überlieferte indigene Wissen, weitergegeben seit fünf Jahrtausenden, die Menschen nicht auf den Umbruch vorbereiten kann«, sagt sie. Pletnikoff schlägt in die gleiche Kerbe, indem sie betont, die Indigenen müssten ihr Wissen erweitern, um bestehen zu können.

Das Alaska Harmful Algal Bloom Network sei hierbei eine viel versprechende Initiative, lobt Lefebvre – ein



inspirierendes Beispiel dafür, welche Vorteile es hat, wenn global vernetzte Experten mit Menschen in entlegenen Gemeinden zusammenarbeiten, um gemeinsam Umweltprobleme anzugehen. Was Indigene dabei lernen, beispielsweise über die Folgen des Klimawandels, geben sie an ihre Stammesmitglieder weiter und klären diese darüber auf, wie sich Selbstversorger angesichts des rasanten ökologischen Umbruchs verhalten sollten. Das Gefühl, über große Entfernungen hinweg zu helfen, Menschen in abgelegenen Regionen zu schützen, sei sehr motivierend, sagt Lefebvre.

In ganz Alaska gehen jetzt indigene Initiativen an den Start, die sich am Vorbild des Alaska Harmful Algal Bloom Network orientieren. 2016 legte der südliche Stammesverband Sitka Tribe of Alaska ein eigenes Programm auf, um Schalenweichtiere auf Toxinbelastung zu untersuchen. Hierfür dienen so genannte ELISA-Tests, die Proteine (beispielsweise Giftstoffe) zielgerichtet mit Hilfe von Antikörpern nachweisen, die auf einem Trägermedium aufgebracht sind. In einem Zeitraum von rund fünf Jahren wurden im Rahmen dieses Programms 1700 Weichtierproben untersucht. Dabei zeigte sich, dass der Toxingehalt von Mies-, Herz- und Sandmuscheln immer häufiger die sicheren Grenzwerte überschreitet. Der Stammesverband hat deshalb wiederholt vor dem Verzehr von selbst gesammelten Muscheln gewarnt.

Auf der Insel Kodiak südwestlich von Seldovia betreibt die gemeinnützige Organisation Kodiak Area Native Asso-



ciation, die Indigene unterstützt, ein kostenloses Schalenweichtier-Testprogramm für Selbstversorger. Es erstattet die Ausgaben, um Proben zum Sitka Tribe of Alaska zu verschiffen und dort untersuchen zu lassen, und es stellt Informationen sowie Mittel bereit, um die Risiken toxischer Algenblüten zu mindern.

2021 schaffte das Alutiiq Pride Marine Institute in der Stadt Seward (Südalaska), das sieben indigene Stämme vertritt, eine ELISA-Maschine an, um PSP- und ASP-Toxine nachzuweisen. Die Mitarbeiter hoffen, Wasser- und Muschelfleischproben jeweils binnen einer Woche testen zu können und auf dieser Grundlage das umfassendste einschlägige Überwachungsprogramm Alaskas auf die Beine zu stellen. Zudem haben sie ein Onlineportal erstellt, wo Einwohner aus dem gesamten Bundesstaat ihre Probandaten über ein Onlineformular einstellen können.

Trotz all dieser Initiativen liegt eine Lösung des Problems in weiter Ferne. Wright betont, die Überwachungs-

**DEN TOXINEN AUF DER SPUR** Dominic Hondolero, Angehöriger des nordamerikanischen Volksstammes der Tlingit, arbeitet als Wissenschaftler für die National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Zu seinen Aufgaben gehört es, Proben aus dem Meer zu nehmen (links) und das Plankton darin zu untersuchen. In seinem Labor hält er Sandaale und Pazifische Kabeljaus in Wasserbehältern (unten). Er prüft die Fische auf Giftstoffe, die sich bei toxischen Algenblüten in ihrem Organismus angereichert haben könnten.

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema: [spektrum.de/t/meere](https://www.spektrum.de/t/meere)



EPICSTOCKMEDIA / FOTOLIA

maßnahmen der Sitka Tribe und Alutiiq Pride seien ein guter Anfang, doch er sorgt sich um die Verlässlichkeit der Messergebnisse. ELISA-Tests seien von der US-Arzneimittelbehörde FDA nicht dafür zugelassen, Schalenweichtiere zu kontrollieren, die für den menschlichen Verzehr bestimmt sind. Denn bei den Algengiftstoffen, die sich in ihnen anreichern, handle es sich um ein Gemisch hunderter verschiedener Chemikalien, und manche davon ließen sich mit ELISA nicht nachweisen. US-Forscher haben jahrelang versucht, ein tragbares Gerät für die Detektion von PSP-Giften zu entwickeln, scheiterten aber an der komplexen Vielfalt dieser Substanzen. Hier liegt der Grund, warum der archaische Mäusetest – bei dem man schaut, ob die Nager an kontaminiertem Fleisch sterben –, noch immer angewendet wird.

Wright zufolge erlauben nur Mäusetests oder kostspielige molekulare Analysen eine definitive Aussage darüber, ob sich ein beprobtes Schalenweichtier bedenkenlos verzehren lässt. Beide dürften auf absehbare Zeit nicht in indigenen Testeinrichtungen zum Einsatz kommen: Tierversuche sind streng reguliert, und molekulare Analysen







KILLI YÜYAN



**AUS DER GEZEITENZONE** Eine Dreizehenmöwe, einige Miesmuscheln und zwei Heringe aus Seldovia sind für den Transport zur alaskischen Stadt Anchorage tiefgefroren worden (links). Dort sollen sie in einem Labor untersucht werden. Meerohren (oben) zählen zu den Schnecken und werden von indigenen Küstenbewohnern in großen Mengen verzehrt. Die Mitarbeiter des Alutiiq Marine Pride Institute züchten sie zu Forschungszwecken. Sie betreiben auch Planktonkulturen (ganz oben), um damit Schalenweichtiere zu füttern.

erfordern teure Laborausstattung sowie speziell ausgebildetes Personal.

Jeff Hetrick, Direktor am Alutiiq Pride Marine Institute, ist überzeugt, es mangle schlicht an Geld und gutem Willen auf staatlicher Seite, um das Problem in den Griff zu bekommen. Er glaubt nicht, dass es die technische Komplexität ist, die einer Lösung im Weg steht. »Wir sind zum Mond geflogen und auf dem Weg zum Mars«, fragt er, »aber wir müssen immer noch Mäusen Gift einflößen, um Muschelfleisch zu testen?«

Unterdessen setzen die indigenen Netzwerke ihre Arbeit fort. Im Spätsommer 2021, kurz nachdem ich Seldovia im

Flugzeug verlassen habe, erhält Opheim einen Anruf. Am Strand verende gerade eine Dreizehenmöwe, teilt man ihm mit. Als er an der beschriebenen Stelle ankommt, ist die Möwe schon beinahe tot; kurz darauf stirbt sie. Opheim friert sie ein und fragt per E-Mail bei Wright an, ob dieser den Vogel auf Algentoxine testen könne. Die Antwort lautet Ja.

Doch wie kommt das verendete Tier in Wrights Labor, 120 Meilen entfernt? Hier springt Killii Yüyan ein, der chinesisch-amerikanische Fotograf indigener Abstammung, der die Bilder zu diesem Artikel geschossen hat. Er nimmt den Vogelkadaver und einige Miesmuscheln vier Wochen später mit, als er von Seldovia nach Anchorage fährt. Nachdem er sie Wright übergeben hat, bringt der sie zusammen mit den Eingeweiden eines Silberlachs in sein Labor.

### Hoffen auf Besserung

Wenn es Indigenen und Wissenschaftlern gemeinsam gelinge, mit dem Problem der toxischen Algenblüten an Alaskas endlosen Küsten fertigzuwerden, dann ließe sich die Gefahr vielleicht überall auf der Welt bändigen, hofft Opheim. Was die Selbstversorger aus seiner Sicht am nötigsten brauchen, sind Daten, denen sie vertrauen, auf die sie Zugriff haben und die ihnen helfen, ihre künftige Ernährung zu sichern. Stunden mehr bundes- und landesstaatliche Mittel bereit, um Ausrüstung und Personal zu bezahlen, würde er ein stammeseigenes Labor einrichten, damit die Indigenen ihre Proben auf kurzem Weg analysieren können.

Im Herbst 2021 treffen die Ergebnisse aus Wrights Labor in Seldovia ein. Die verendete Dreizehenmöwe und die Miesmuscheln waren nur wenig mit Giftstoffen belastet – die Innereien des Silberlachs dagegen zeigten sich stark kontaminiert. Dazu passt eine E-Mail, die Wright etwa zeitgleich aus der Russischen Akademie der Wissenschaften bekommt. Darin beschreibt eine Forscherin, sie und ihr Team hätten in den zurückliegenden 20 Jahren bei Untersuchungen nahe Wladiwostok stets nur einige hundert toxische Algen pro Liter Meerwasser gefunden. Vor Kurzem aber seien dort verblüffende 200 000 *Alexandrium catenella*-Exemplare pro Liter nachweisbar gewesen. Die Algen an dem betroffenen Küstenabschnitt vermehrten sich massiv, heißt es in der Mail. Ob Wright zu einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit bereit sei, fragt die Forscherin an. Denn immer deutlicher zeigt sich: Die ökologischen Veränderungen, vor denen die Region steht, lassen sich nur gemeinsam bewältigen. ◀

### QUELLEN

**Anderson, D. M. et al.:** Evidence for massive and recurrent toxic blooms of *Alexandrium catenella* in the Alaskan Arctic. PNAS 118, 2021

**Hoagland, P. et al.:** Lessening the hazards of florida red tides: A common sense approach. Frontiers in Marine Science 7, 2020

**Yizhen, L. et al.:** Dynamics of an intense *Alexandrium catenella* red tide in the Gulf of Maine: Satellite observations and numerical modeling. Harmful Algae 99, 2020

# PHOSPHOR-RECYCLING WERTVOLLES ABWASSER

Ab 2029 dürfen Landwirte ihre Felder nicht mehr mit Klärschlamm düngen. Um die Versorgung mit dem unabdingbaren Nährstoff Phosphor zu sichern, braucht es daher neue Technologien, die das Element aus Klärschlamm und dessen Aschen zurückgewinnen.



**Martin Bertau** (links) leitet das Institut für Technische Chemie an der TU Bergakademie Freiberg. Seine Forschung dreht sich rund um die nachhaltige Gewinnung von Rohstoffen. **Peter Fröhlich** forscht dort zur Entwicklung neuer Technologien für die Sicherung unserer Rohstoffversorgung.

» [spektrum.de/artikel/2008762](https://spektrum.de/artikel/2008762)



**DAS VERFAHREN** der Auto-  
ren gewinnt Phosphat aus  
verschiedenen Quellen wieder  
und stellt Phosphorsäure her.

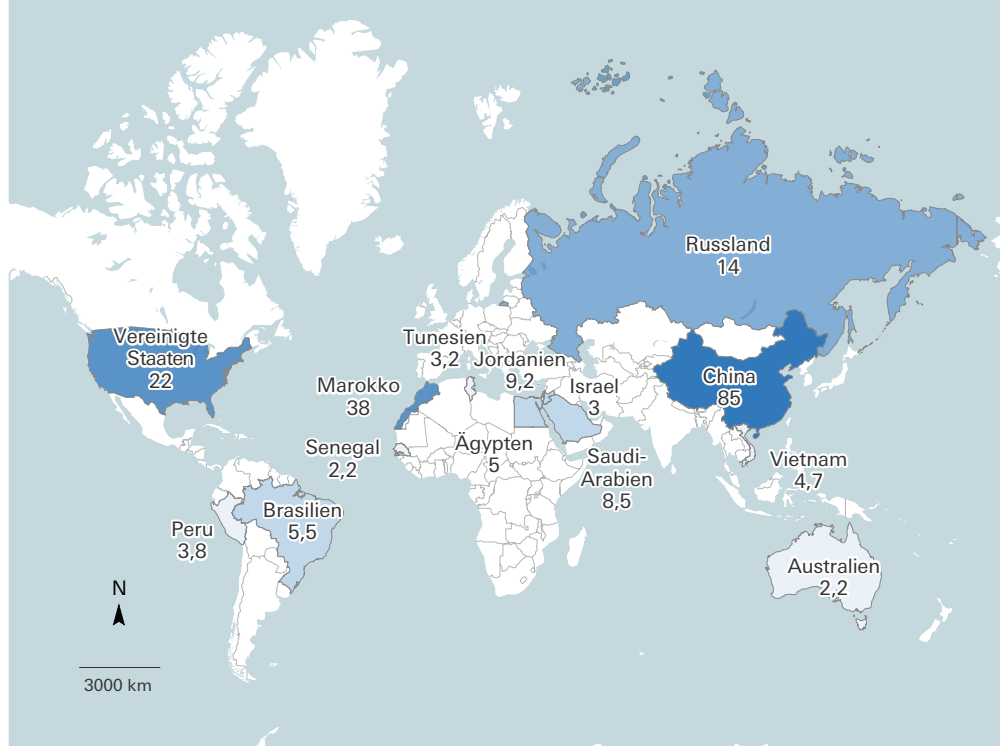
▶ Ohne Phosphor gäbe es kein Leben auf der Erde. Das Element ist nicht nur Hauptbestandteil von Knochen und Zähnen, sondern findet sich auch im Rückgrat unserer DNA. Glücklicherweise gibt es auf unserem Planeten genügend davon. Dennoch interessieren sich Fachleute zunehmend dafür, wie man das Element am besten recyceln kann, um die weltweiten Vorkommen langfristig zu schonen.

Phosphor kommt in der Natur fast immer als Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) vor. Die Phosphatlagerstätten, die wir heute kennen und abbauen, haben sich vor vielen Millionen Jahren gebildet. Nährstoffreiche und damit phosphathaltige ozeanische Tiefenwässer finden immer wieder ihren Weg an die Kontinentalhänge und gelangen so an die Meeresoberfläche, wo sie das Wachstum von Plankton begünstigen. Nach ihrem Absterben sinken die Kleinstlebewesen auf den Meeresgrund, und durch Reaktionen mit Kalkstein entstehen dort die Phosphatlager.

Jedes Jahr werden mehr als 200 Millionen Tonnen Phosphat gefördert, hauptsächlich in Form von Apatit (siehe »Die wichtigsten Phosphatsalze«). Aus ihm gewinnt man Phosphorsäure, die zentrale Drehscheibe der Phosphorchemie. Die chemische Industrie verarbeitet weltweit 90 Prozent davon zu Düngemitteln, der Rest geht etwa in die Tierfutter- oder Lebensmittelproduktion oder wird Bestandteil von Katalysatoren für die Chemieindustrie.

### Nährstoff für die Welt

Der globale Bedarf an Phosphor steigt stetig, denn um die zunehmende Weltbevölkerung zu ernähren, bedarf es einer leistungsfähigen Landwirtschaft. Und dazu ist neben ausreichenden Nutzflächen eine Düngung mit Phosphat notwendig, um das Pflanzenwachstum zu fördern.



**PHOSPHATFÖRDERUNG WELTWEIT (in Millionen Tonnen im Jahr 2021).** Deutschland besitzt keine Phosphatlagerstätten und ist bislang von Importen aus Marokko, Israel und Russland abhängig.

Doch es gibt ein Problem mit den Phosphatlagerstätten: Unter bestimmten geologischen Konstellationen nimmt das abgestorbene Plankton auf seinem Weg in die Tiefe die im Meerwasser gelösten Schwermetalle mit, die sich dann gemeinsam mit dem Phosphat einlagern. Das Tückische: Mit zunehmender Abbautiefe in einer Lagerstätte nehmen gleichzeitig die Schwermetallgehalte zu, so dass sich Kadmium, Uran und andere giftige Substanzen via Düngemittel in immer größerem Maß auf unseren Agrarflächen anreichern. Über die Zeit gelangen sie ins Grundwasser und in die Nahrungskette bis zum Menschen.

Die Schwermetallanreicherung in Böden ist seit Längerem bekannt, und so hat die Europäische Union den Grenzwert für Kadmium in Düngern auf 60 Milligramm pro Kilogramm  $\text{P}_2\text{O}_5$  herabgesetzt (ab Juli 2022). Die Schadstoffe lassen sich reduzieren, indem man aus den gewonnenen Phosphaterzen eine hochwertige, reine und schwermetallfreie Phosphorsäure für die Düngemittelproduktion herstellt. Die Aufarbeitung der Ausgangsstoffe wird dadurch allerdings aufwändiger und teurer.

Alles Phosphat, das von den Äckern über die Pflanzen in die Nahrungskette gelangt, findet sich eines Tages im Abwasser. Von dort aus landet es durch Zugabe von Fällsalzen im Klärschlamm. Den nutzen Landwirte derzeit direkt, um ihre Felder zu düngen: Ein vorbildlicher Kreislauf, der die Lagerstätten schont, könnte man meinen.

Weil der Klärschlamm aber noch organische Schadstoffe wie Hormone, Antibiotika und perfluorierte Substanzen enthält, wird das künftig nicht mehr erlaubt sein. Stattdessen hat der Gesetzgeber die Klärschlammherzeuger verpflichtet, die enthaltenen Wertstoffe weitestgehend zurückzugewinnen – so auch den Phosphor. Das ist überdies

## AUF EINEN BLICK PHOSPHOR-RECYCLING

- 1 Jährlich werden weltweit mehr als 200 Millionen Tonnen Rohphosphat gefördert. Das meiste davon wird zu Düngemitteln verarbeitet.
- 2 Deutschland besitzt keine eigenen Phosphatlagerstätten und ist vollständig auf Importe angewiesen.
- 3 Phosphor findet sich aber auch im Abwasser und Klärschlamm. Ab 2029 müssen Kläranlagenbetreiber den Rohstoff laut Gesetz daraus zurückgewinnen. Erste Verfahren stehen vor der industriellen Umsetzung.

## Die wichtigsten Phosphatsalze

Abgesehen von wenigen Ausnahmen kommt Phosphor ausschließlich in seiner höchsten Oxidationsstufe als Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) vor. Als solches geht es stabile Verbindungen mit anderen Elementen ein: Mit Kalzium beispielsweise bildet es das Mineral Apatit mit der chemischen Formel  $\text{Ca}_5[(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})]$ . Von diesem wichtigen Phosphaterz werden jedes Jahr mehr als 200 Millionen Tonnen gefördert. Mit zweiwertigem Eisen entsteht das Mineral Vivianit mit der Formel  $\text{Fe}_3[\text{PO}_4]_2$ , dreiwertiges Eisenphosphat  $\text{FePO}_4$  wird bei der Phosphatierung von Metalloberflächen zum Korrosionsschutz eingesetzt. Das seltene aluminiumhaltige Mineral Wavellit hat die Zusammensetzung  $\text{Al}_3[(\text{OH},\text{F})_3(\text{PO}_4)_2]$ . Die Metallsalze des Phosphats werden auch künstlich erzeugt, wenn in Kläranlagen Phosphat durch chemische Fällungsreaktionen aus dem Abwasser entfernt wird, um eine Überdüngung der Oberflächengewässer zu vermeiden. In den Anlagen tritt noch eine weitere Verbindung auf, das Magnesium-Ammonium-Salz Struvit  $(\text{NH}_4)_2\text{Mg}[\text{PO}_4]$ . Es spielt im Klärprozess eine besondere Rolle und lässt sich gut im Phosphatrecycling einsetzen.

insofern sinnvoll, als Deutschland über keine eigenen Phosphatlagerstätten verfügt und vollständig von Importen aus Marokko, Israel und Russland abhängig ist (siehe »Phosphatförderung weltweit«). Der springende Punkt bei diesem Vorhaben ist neben den technischen Hürden die Wirtschaftlichkeit: Steigt der Reinigungsaufwand, erhöht sich der Preis für die Phosphorsäure, was wiederum die Kosten für Düngemittel und somit für Grundnahrungsmittel in die Höhe treibt.

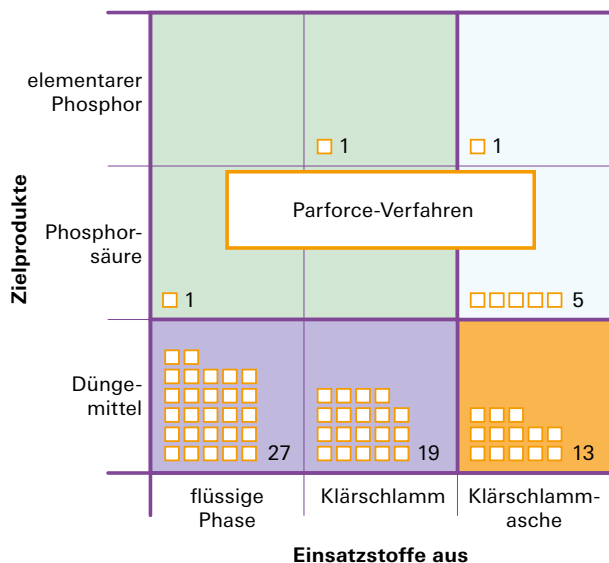
In der Bundesrepublik fallen jährlich etwa 1,8 Millionen Tonnen an getrocknetem Klärschlamm an. Davon werden über 75 Prozent verbrannt und in Deponien entsorgt, der Rest geht zum einen in die Landwirtschaft, zum anderen dient er als Ersatzbrennstoff in der Zementindustrie. Doch mit der Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung fallen diese Entsorgungswege weg. Der in einem Jahr entstehende Klärschlamm enthält rund 75 000 Tonnen Phosphor. Gleichzeitig importiert Deutschland jedes Jahr 120 000 Tonnen des Elements in Form mineralischer Düngemittel. Demnach ließen sich theoretisch bis zu 60 Prozent dieser Importe ersetzen, wenn man allein den im Klärschlamm gebundenen Phosphor nutzen würde. Das schont nicht nur die Lagerstätten, sondern entlastet auch die Umwelt.

### Die Suche nach der besten Methode

Die Schwermetallbefrachtung ist aber nur einer der Gründe, die für ein Phosphorrecycling sprechen. Daneben bringen der Abbau und die Aufbereitung von Phosphaterzen Probleme mit sich, angefangen beim Tagebau bis zu radioaktiven Gipshalden, die als Abfall entstehen. Viele der Abbaustätten liegen außerdem in politisch unsicheren Gegenden. Darum schreibt das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung von 2012 vor, Wertstoffe grundsätzlich zu recyceln beziehungsweise wiederzugewinnen. Das gestaltet sich für die Kläranlagenbetreiber jedoch überaus schwierig. Und so ringen heute zahlreiche Forschungseinrichtungen, Unternehmen und Kläranlagenbetriebe um die beste Art und Weise, den begehrten Phosphor aus dem Abwasser respektive dem Klärschlamm herauszutrennen (siehe »Viele Wege«).

Um ihre Recycling-Verpflichtungen zu erfüllen, wäre es der Abwasserbranche am liebsten, den Klärschlamm zu verbrennen und Phosphat aus den dabei entstehenden Aschen zurückzugewinnen (siehe »Aus Klärschlamm wird Asche«). Die Methode hat allerdings erhebliche Schwächen: Zum einen reichen die Kapazitäten für diese Art der Verbrennung derzeit nur für rund die Hälfte der in Deutschland anfallenden Klärschlämme aus. Zum anderen existieren noch keine Phosphor-Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlamm-Asche, die technisch verlässlich und wirtschaftlich vertretbar sind.

Das liegt einerseits an der komplexen Aschechemie selbst und andererseits daran, dass laut Abfallklär-



□ □ Zahl der Verfahren in Entwicklung  
□ □ □

- sehr hohes Risiko, aufwändig und teuer
- hohes Risiko, aber einfach und günstig
- geringes Risiko, aber aufwändig und teuer
- noch kaum verfolgt

### VIELE WEGE führen zum Phosphatrecycling.

Welche Verfahren letztlich erfolgreich sind, wird

sich noch zeigen. Momentan konzentrieren

sich die meisten darauf, direkt Dünger herzustellen.

schlammverordnung mindestens 80 Prozent des Phosphors zurückgewonnen werden müssen – eine hohe Hürde.

Die Zusammensetzung von Klärschlämmen variiert abhängig davon, welche Industrieunternehmen Abwasser einleiten und ob es gemeinsam mit dem Regenwasser gesammelt wird. Zudem schwankt sie saisonal durch Niederschläge und die verwendeten Fällmittel. Durch diese Faktoren kann der Phosphorgehalt von 2 bis 25 Gewichtsprozent  $P_2O_5$  rangieren! Er beeinflusst aber maßgeblich, mit welchem technischen und wirtschaftlichen Aufwand sich die gesetzlich vorgeschriebene Rückgewinnungsverpflichtung erfüllen lässt.

Es gibt heute verschiedene Verfahren zum Recycling von Phosphor mit unterschiedlichen Einsatzstoffen und Produkten:

Will man Phosphat aus der flüssigen oder festen Phase des Abwasserstroms (also aus Abwasser oder Klärschlamm) gewinnen, so muss sein Anteil aus gesetzlichen Gründen bereits während der Schlammbehandlung in der Kläranlage auf unter 20 Gramm pro Kilogramm Trockenmasse gesenkt werden. Derzeit fällt man Phosphat vorwiegend mit Hilfe von Metallsalzen (Kalzium,  $Ca^{2+}$ ; Eisen,  $Fe^{3+}$ ; oder Aluminium,  $Al^{3+}$ ) aus, um es aus dem Abwasser zu entfernen. Weil sich dabei aber schwerlösliche Phosphate bilden, die nicht mehr wirtschaftlich aus dem Klärschlamm abzutrennen sind, ist das keine ernsthafte Option für das Recycling des begehrten Rohstoffs. Alternativ ließe sich der Nährstoff mit Mikroorganismen abtrennen, die ihn in ihren Zellen einlagern. Durch anschließendes Aufbrechen der Zellstruktur wird das Phosphat freigesetzt und kann etwa durch eine pH-Wert-Erhöhung aus der wässrigen Phase abgetrennt werden. An solchen mikrobiellen Verfahren mangelt es in Deutschland jedoch.

Bei Pyrolyseverfahren wiederum erhitzt man den Klärschlamm unter Luftausschluss und erhält Kohle. Dabei entstehen aber giftige Abwässer, die hohe Mengen polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) enthalten. Diese Chemikalien gelten als hochgradig krebserregend und wassergefährdend. Dementsprechend lässt sich die durch die Pyrolyse entstehende Biokohle nicht direkt als Phosphor-Rezyklat verwenden, auch weil sie nach der Düngemittelverordnung nicht zugelassen werden kann. Denn es ist unklar, wie viele PAK sie enthält und wie viele somit potenziell in den Ackerboden gelangen können. Darüber hinaus werden bei dem Prozess noch weitere Schadstoffe konzentriert.

### **Erst den Klärschlamm verbrennen, dann verarbeiten – das scheint vielen der beste Weg**

Zahlreiche Branchen in Deutschland sehen die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammaschen daher als die beste Lösung an. 2019 wurden bereits mehr als 65 Prozent der hier zu Lande anfallenden Klärschlämme verbrannt – davon allerdings mehr als die Hälfte in Mitverbrennungsanlagen, überwiegend Kohlekraftwerken. Durch die Vermischung von Klärschlamm mit anderen, nicht phosphorhaltigen Brennstoffen ist der Phosphorgehalt der so erhaltenen Aschen jedoch nur noch minimal. Ihn hieraus zurückzugewinnen ist unrealistisch oder zumindest unwirt-

schaftlich. Daher braucht es andere Ansätze, um den Nährstoff aus Klärschlammaschen zurückzuholen:

Erstens lassen sich die Aschen selbst zu Düngemitteln umsetzen oder können Rohphosphat in der großtechnischen Düngemittelherstellung teilweise ersetzen. Will man die Aschen direkt auf dem Feld ausbringen, müssen sie bereits die Kriterien der Düngemittelverordnung erfüllen. Gleiches gilt, sofern man sie zu Düngern weiterverarbeitet, ohne vorher den Anteil von Problemstoffen wie etwa Schwermetallen zu reduzieren. Dass der Gehalt der Inhaltsstoffe in den Klärschlammaschen stark variiert, macht deren Verarbeitung zu Düngern allerdings schwierig, weil die Kunden standardisierte Produkte mit relativ konstanter Zusammensetzung erwarten. Weiterhin ist die Herstellung gemessen am Wert der Erzeugnisse sehr teuer. Für die Beimengung von Klärschlammaschen in etablierte großtechnische Düngemittelprozesse sind neben Schwermetallen außerdem Störstoffe wie Eisen problematisch, denn das Metall schädigt Produktionsanlagen und beeinträchtigt die Qualität des Erzeugnisses.

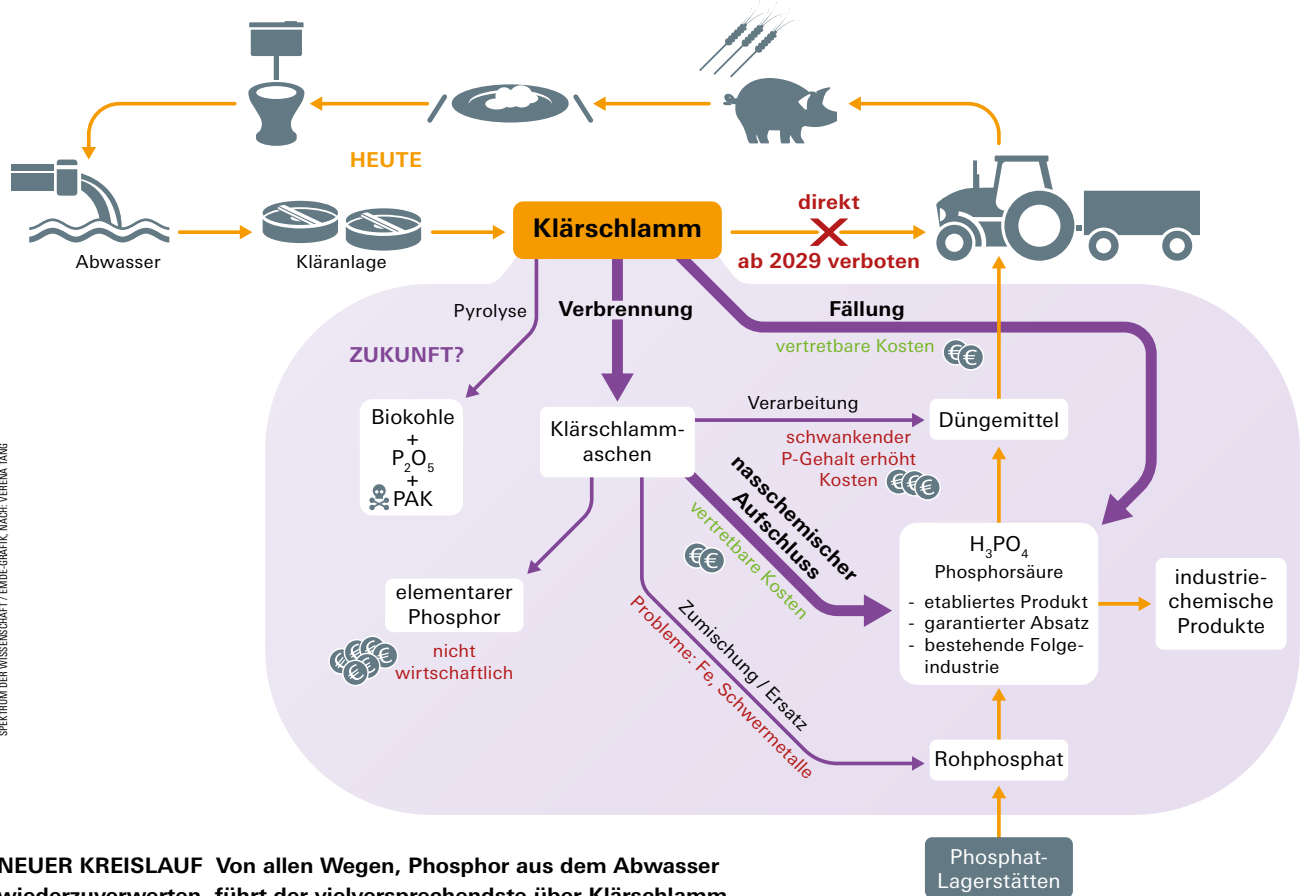
Zweitens ließe sich aus Klärschlammaschen in Schmelz-Reaktionsöfen theoretisch elementarer Phosphor erzeugen – auf ähnliche Weise hat man in Deutschland den Stoff bis in die 1980er Jahre aus Apatiten gewonnen. Der technische und energetische Aufwand hierfür ist jedoch enorm, und die Aschen enthalten im Vergleich zu den Mineralen nur wenig Phosphat. Bereits bei Phosphaterzen mit einem Anteil von gut 30 Prozent  $P_2O_5$  lohnt sich

## **Aus Klärschlamm wird Asche**

In Deutschland fallen pro Jahr etwa 1,8 Millionen Tonnen Klärschlamm-trockenmasse an. Davon geht rund ein Viertel in die Landwirtschaft. Der Löwenanteil von 75 Prozent wird verbrannt, etwa zur Hälfte in so genannten **Monoverbrennungsanlagen**. Dabei verbrennt man ein Brenngut allein und mischt es nicht mit anderen. Weil es hierbei ausschließlich auf die Zusammensetzung und nicht auf die Herkunft der Brennstoffe ankommt, lassen sich problemlos Klärschlämme aus verschiedenen Kläranlagen im selben Prozess veraschen. Die Monoverbrennung ist allerdings vergleichsweise teuer, weil sie auf ein spezifisches Brenngut ausgelegt ist. Mangelnde Auslastung lässt sich daher nicht durch andere Stoffe kompensieren.

Die **Mitverbrennung (oder Co-Verbrennung)** hingegen erlaubt es, verschiedene Brenngüter wie Klärschlamm, Kohle oder Müll zu vermischen und gemeinsam zu veraschen. Hier sind Herkunft und Zusammensetzung unerheblich. Wirtschaftlich von Vorteil ist die Variabilität der Brenngüter, die eine ganzjährige Auslastung gestattet.





SPECTRUM DER WISSENSCHAFT / ERDE-GRABIK, MACH, VERENA TANG

**NEUER KREISLAUF** Von allen Wegen, Phosphor aus dem Abwasser wiederzuverwerten, führt der vielversprechendste über Klärschlamm und Phosphorsäure. Doch auch andere Lösungen sind denkbar.

das Verfahren heute nicht mehr. Ein Recycling über elementaren Phosphor aus den niedrigkonzentrierten Klärschlämmen und Klärschlammaschen mit 2 bis 25 Prozent  $P_2O_5$  wird also niemals auch nur annähernd wirtschaftlich arbeiten.

Im dritten Ansatz gewinnt man aus den Aschen Phosphorsäure oder Kalziumphosphate, die als wertvolle Rohstoffe dienen können. Um Phosphat auszufällen, verwendet man Eisen- und Aluminiumsalze. Dabei bilden sich schwerlösliche Verbindungen – sie anschließend wieder abzutrennen ist aufwändig und teuer, und daher wird auch dieses Verfahren nicht kostendeckend sein. Wie bei anderen Ansätzen steigen hier ebenfalls die Abwassergebühren, denn die Verantwortung für die Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben zum Phosphorrecycling trägt der Klärschlammherzeuger, sprich die Kommune oder die Stadt, und der wird die Zusatzkosten an Bürgerinnen und Bürger weitergeben.

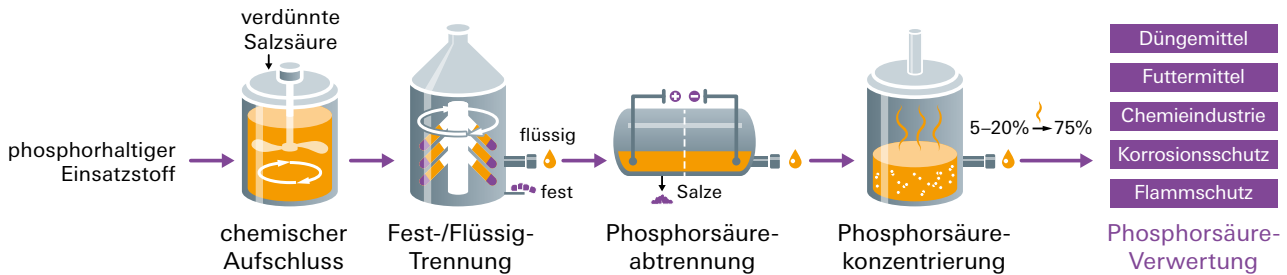
Das Konzept hat aber einen entscheidenden Vorteil: Phosphorsäure ist ein hochwertiger Grundstoff mit gesicherter Absatzmöglichkeit, weil die chemische Industrie daraus zahlreiche Dünge- und Futtermittel sowie Spezialchemikalien herstellt. Darüber hinaus erfüllt der Stoff eine wichtige Anforderung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Es besagt, dass ein Abfallstoff in ein für den Markt zugelassenes Produkt verwandelt werden muss. Einige Verfahren sind an dieser Vorgabe schon gescheitert. Daher haben wir uns entschieden, Phosphorsäure zum Ziel unseres

Recyclingverfahrens zu machen. Unter der Vielzahl der unterschiedlichen Konzepte haben wir an der TU Bergakademie Freiberg das »Parforce-Verfahren« entwickelt und mittlerweile in einer Ausgründung in den Markt gebracht. Allein mit diesem Prozess kann man derzeit Phosphorsäure sowohl aus Klärschlämmen über die Abtrennung von Struvit direkt in der Kläranlage als auch aus Klärschlammaschen gewinnen.

**Viele Einsatzstoffe, ein Produkt**

2016 haben wir mit dem Bau einer Demonstrationsanlage begonnen. Bereits im darauf folgenden Jahr zeigten wir, dass das Verfahren im größeren Maßstab mit bis zu einer Tonne Ausgangsmaterial pro Tag funktioniert. Der verfahrenstechnische Vorteil der Anlage ist das breite Spektrum an Stoffen, die verarbeitet werden können. Dazu zählt nicht nur der bereits erwähnte Apatit, sondern auch die in der Kläranlage anfallenden schwerlöslichen Phosphate Magnesiumammoniumphosphat, Eisenphosphat und Aluminiumphosphat. Ferner eignen sich Klärschlammaschen sowohl aus der Co- als auch der Monoverbrennung. Aktuell planen wir eine Pilotanlage mit einem Durchsatz von bis zu 1000 Tonnen pro Jahr.

Das chemische Verfahren besteht aus vier Schritten (siehe »Parforce-Verfahren«). Zuerst löst man mit Hilfe von Salzsäure oder Salpetersäure die Phosphate aus dem Einsatzstoff heraus. Anschließend filtert man feste Rückstände ab, um eine klare Flüssigkeit zu erhalten. Dabei

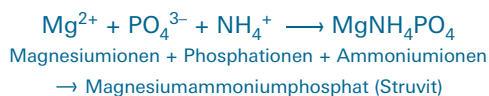


**PARFORCE-VERFAHREN** Das von den Autoren entwickelte Verfahren stellt Phosphorsäure in vier Schritten aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammасhe her. Der Clou: Es lassen sich verschiedene Ausgangsstoffe verarbeiten, und die handelsübliche Phosphorsäure bedient bestehende Märkte.

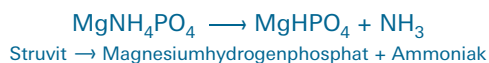
## Durch Phosphor- zum Stickstoffrecycling

Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) ist mit 144 Millionen Tonnen (Stand 2020) die Industriechemikalie, von der jährlich am meisten produziert wird. Das geschieht unter hohem energetischem Aufwand auf Basis von fossilen Rohstoffen (letztlich Erdgas) und setzt daher große Mengen an  $\text{CO}_2$  frei. In der Klärtechnik wiederum überführt man  $\text{NH}_3$  in Wasser und seinen Ausgangsstoff Stickstoff. Es gehört zu den gravierenden Versäumnissen der Klimaschutzpolitik, dass sie dieses Potenzial nicht längst aufgegriffen hat. Denn würde man Phosphor aus Klärschlamm über das Mineral Struvit ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4$ ) zurückgewinnen, könnte man damit das wertvolle  $\text{NH}_3$  binden – das sich an anderer Stelle wieder freisetzen lässt, um den Struvit in  $\text{MgHPO}_4$  zu überführen. Aus diesem erhält man letztendlich Phosphorsäure:

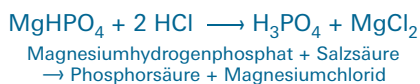
### 1. Stufe: Fällung



### 2. Stufe: Kalzinierung



### 3. Stufe: Gewinnung von Phosphorsäure



fallen zwischen 40 und 60 Prozent mineralischer Reststoff an, der im Wesentlichen aus Silikat besteht. Bisher fand man bei keinem Recyclingverfahren eine praktische Verwendung dafür. Uns ist es jedoch gelungen, aus ihnen betonähnliche Stoffe herzustellen, Geopolymere genannt. Sie sind gegen starke Säuren beständig und eignen sich als Wärmedämmstoffe.

Im dritten Schritt trennen wir die von den Säuren stammenden Chlorid- beziehungsweise Nitrationen von der Rohphosphorsäure ab. Im Gegensatz zu bisherigen Verfahren, bei denen man Kalziumionen mittels Schwefelsäure als Kalziumsulfat (Gips) ausfällt, erfolgt die Trennung durch einen elektrochemischen Membranprozess namens Elektrodialyse. Man benötigt also weder Schwefelsäure noch fällt Gips als Reststoff an. Stattdessen erhält man Rohphosphorsäure und eine Lösung mit den abgetrennten Salzen.

Erstere besitzt je nach Phosphorgehalt des Ausgangsstoffs eine Konzentration zwischen 5 und 20 Prozent. Durch Vakuumverdampfung konzentrieren wir sie im letzten Schritt auf ihre handelsübliche Form von rund 75 Prozent  $\text{H}_3\text{PO}_4$  auf.

Der Prozess erfüllt zwei wesentliche Anforderungen an ein modernes Phosphorrecycling: Zum einen lassen sich verschiedene Stoffe einsetzen, zum anderen ergänzt das Verfahren die bestehenden Märkte.

### Recycling weiter denken

Gerade der zweite Punkt ist unverzichtbar, denn die aufwändigen Behandlungsschritte für Klärschlämme sind schon im Vorfeld der eigentlichen Rückgewinnung so teuer, dass ein Phosphorrecycling in jeden Fall Belastungen für die Abwassergebührenzahler mit sich bringen wird. Diese lassen sich aber gering halten: Das Rezyklat in Form von Phosphorsäure kann sämtliche Phosphorsäuremärkte bedienen und hat damit die besten Voraussetzungen für einen gesicherten Absatz.

Ein europaweit ungelöstes Problem ist daneben die Wiederverwertung von Stickstoff. Die EU-Kommission verhängt Strafzahlungen gegen Länder, deren Grundwasser zu stark mit Stickstoff belastet sind. Trotzdem sehen bislang nur wenige das Potenzial eines gekoppelten Phosphor- und Stickstoffrecyclings. Stattdessen

fokussiert sich die Politik auf ein Auslaufen der Biogasanlagen, obwohl doch deren Gärreste reich an beiden Elementen sind. Daher könnte man den Gärrest als Rohstoff gleichzeitig für das Phosphor- und das Stickstoffrecycling nutzen. Tatsächlich leistet das unser Verfahren derzeit als einziges. Denn durch seine Konzeption kann es Struvit verarbeiten, Magnesiumammoniumphosphat ( $(\text{NH}_4)\text{Mg}[\text{PO}_4]$ ). Das Mineral enthält sowohl Stickstoff als auch Phosphor. Beide Elemente lassen sich auf diesem Weg einfach und kostengünstig rezyklieren. Versteht man Biogasanlagen nicht mehr bloß als Biogaserzeuger, sondern als technisches Verfahren zur Reduktion biogener Abfallmengen und darüber hinaus als Rohstoffquelle, zeigt sich, wie über Biogas auch Kohlenstoff in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt wird. Über eine Struvitfällung und nachfolgende Behandlung nach dem von uns entwickelten Verfahren gewinnt man Phosphor und Stickstoff wieder, und der Gärprozess an sich schont die Ressource Wasser.

Wir stehen erst am Anfang einer neuen Entwicklung. Moderne zukunftsweisende Verfahren zur Abfallbehandlung haben sich längst von der reinen Entsorgung verabschiedet und verwerten stattdessen die darin enthaltenen kostbaren Rohstoffe. Recycling geht dabei weit über Plastik und Aluminium hinaus: So enthält Biomasse noch viele ungehobene Potenziale, die wir gerade erst beginnen zu entdecken. ◀

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema: [spektrum.de/t/recycling](http://spektrum.de/t/recycling)



SEMATADESIGN / GETTY IMAGES / ISTOCK

### QUELLEN

**Bertau, M. et al.:** Das Phosphatrecycling zeigt Königsweg zu einer nachhaltigen Phosphorversorgung auf. *ReSource* 32, 2019

**Fröhlich, P. et al.:** The PARFORCE-Technology (Germany). In: Schaum, C. (Hg.): *Phosphorus: Polluter and Resource of the Future: Removal and Recovery from Wastewater*. IWA Publishing, 2018, Kapitel 26

**Greb, V. G. et al.:** Understanding phosphorus phases in sewage sludge ashes: A wet-process investigation coupled with automated mineralogy analysis. *Minerals Engineering* 99, 2016

### LITERATURTIPP

**Krämer, J. et al.:** Rohstoffe: Phosphor zurückgewinnen. *Nachrichten aus der Chemie* 67, 2019

*Eine detailliertere Betrachtung der unterschiedlichen Verfahren*

# Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS



Im Mai erhalten Sie das **Spektrum-Kompakt** »Bioökonomie« kostenfrei zum Download für Abonnentinnen und Abonnenten

Weitere Vorteile und Download:  
[Spektrum.de/plus](http://Spektrum.de/plus)

# CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

## POP-ART-LABOR

Auf uns heute wirken die Anfänge des Fotokopierens ziemlich umständlich und aufwändig. Hinter den verschiedenen Verfahren steckt jedoch raffinierte Chemie. Das wird besonders am Beispiel der Diazotypie deutlich.

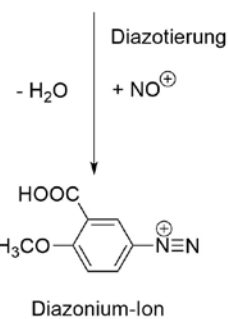
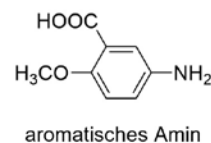


**Matthias Ducci** (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

» [spektrum.de/artikel/2008765](https://spektrum.de/artikel/2008765)

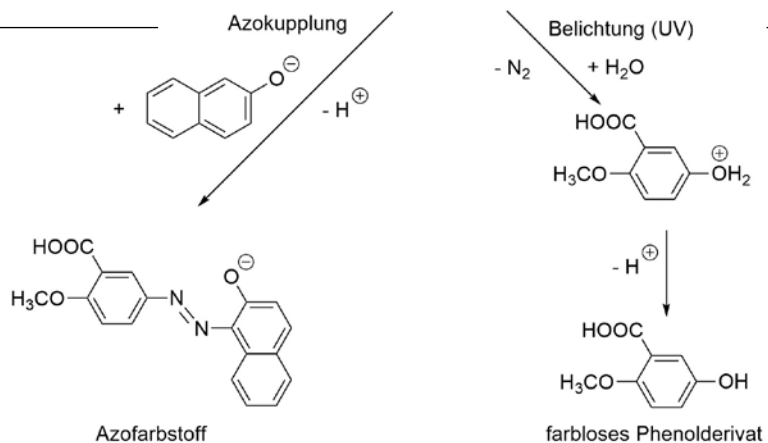
Wer denkt bei dem Wort »Blaupause« zuerst an Chemie? Wohl die wenigsten. Dabei ist eine Blaupause nicht nur im übertragenen Sinn ein Vorbild oder ein Modell, sondern ganz konkret das Abbild eines Originals, das als Vorlage für weitere Vervielfältigungen dient.

Bevor der digitale Druck erfunden wurde, erstellte man Abbilder von Gegenständen – etwa von Pflanzenblättern – und Kopien mit Lichtpausverfahren. Letztere beruhen auf photochemischen Prozessen, die beim Durchleuchten einer transparenten Vorlage auf der Kopierschicht des neuen Bildträgers ausgelöst werden. Anschließend erfolgt der Entwicklungsprozess. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Cyanotypie, die auf den englischen Astronomen und Naturwissenschaftler John F.W. Herschel (1792–1871) zurückgeht. Bei dieser Methode trägt man in Wasser



### Prinzip der Diazotypie

Durch Einwirkung von Salpetriger Säure auf ein aromatisches Amin (oben) entsteht per Diazotierung ein Diazonium-Ion (Mitte). Dieses kann auf zweierlei Arten weiterreagieren: Belichtung spaltet Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) ab, übrig bleibt ein farbloses Phenolderivat (unten rechts). Reagiert das Diazonium-Ion hingegen mit einer Kupplungskomponente, bildet sich ein Azofarbstoff (unten links).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / VERENA TANG, ILMAR. MATTHIAS DUCCI



**LA TOUR EIFFEL** Verwendete Schwarz-Farblos-Folie **a** und das davon durch Diazotypie erhaltene Bild in gelbem Azofarbstoff bei Tageslicht **b** sowie unter UV-Licht **c**. Das Bild zeigt den Eiffelturm in Paris. Im Hintergrund ist in der Bildmitte der Tour Montparnasse ebenfalls erkennbar.

gelöstes Ammoniumeisen(III)-oxalat und rotes Blutlaugensalz auf Papier auf und bestrahlt das Ganze anschließend mit UV-Licht. Dadurch färbt sich das Papier blau, weil Oxalat-Ionen zu Kohlenstoffdioxid oxidiert und Eisen(III)- zu Eisen(II)-Ionen reduziert werden. Letztere bilden mit dem roten Blutlaugensalz den Farbstoff Berliner Blau. Legt man vor der UV-Bestrahlung eine Schablone auf, zeichnen sich die abgedeckten Bereiche weiß auf dem blauen Hintergrund ab – fertig ist die Blaupause.

Nach den gleichen Prinzipien funktioniert die Diazotypie. Sie hat die Cyanotypie als das Verfahren der Wahl für technische Zeichnungen in den 1970er Jahren abgelöst. Der Grund dürfte ein praktischer sein, denn anders als bei der Cyanotypie erhält man hier ein Positiv, also ein farbiges Abbild auf neutralem Hintergrund. Der Unterschied zeigt sich schön in den englischen Bezeichnungen der beiden Verfahren: »blueprinting« und »whiteprinting«.

Die Diazotypie macht sich die Lichtempfindlichkeit von Diazoniumverbindungen und Diazoniumsalz-Lösungen zu Nutze. Der deutsche Chemiker Johann Peter Griess (1829–1888) hat diese Stoffe 1858 entdeckt. Er fand heraus, dass

man sie ganz allgemein herstellen kann, indem man Salpetrige Säure auf aromatische Amine einwirken lässt. Über die Struktur seiner neu entdeckten Verbindungen war er sich allerdings nicht im Klaren. Dennoch war sein Fund der Ausgangspunkt für die Entwicklung der Azofarbstoffe – heute die zahlenmäßig größte Gruppe synthetischer Farben (siehe »Spektrum« November 2018, S. 68).

Entscheidend für die Bildgebung: Unter Lichteinwirkung spaltet das Diazonium-Kation Stickstoff ab, zurück bleibt meist ein farbloser Stoff. In den unbelichteten Bereichen hingegen bleiben die Diazonium-Kationen erhalten und können mit einem geeigneten Reaktions-

**LEUCHTENDE BOTSCHAFTEN** Schreibt man mit einer Lösung, die aus 5-Amino-2-methoxybenzoesäure hergestellte Diazonium-Ionen enthält, ein Wort auf Filterpapier, erscheinen die Buchstaben zunächst dunkel **d**. Unter UV-Licht bildet sich durch Photolyse jedoch ein fluoreszierendes Phenol, so dass die Schrift nach rund fünf Minuten Bestrahlung deutlich zu sehen ist **e**. Umgekehrt lassen sich auf komplett mit der Diazoniumsalz-Lösung befeuchtetem Filterpapier Formen sichtbar machen, indem man eine Schablone darauf legt, mit Tesafilm fixiert und das Papier für fünf bis zehn Minuten mit UV-Licht bestrahlt. Nach dem Entfernen der Schablone zeichnen sich unter UV-Licht die Formen der Schablone auf dem Filterpapier ab **f**.

MATTHIAS DUECI



partner einen Azofarbstoff bilden (siehe »Prinzip der Diazotypie«).

Wie lässt sich das Phänomen aber praktisch nutzen? Die technische Umsetzung der Diazotypie geht auf den Priester und Chemiker Gustav Kögel (1882–1945) zurück. Er war ab 1921 an der damaligen TH Karlsruhe tätig und gründete dort das Institut für Technische Photochemie und Wissenschaftliche Photographie. Seine auf die Firma Kalle in Wiesbaden übertragenen Patente führten zur Entwicklung von Diazo-Lichtpausenpapier. Es wurde unter dem Handelsnamen »Ozalid« vertrieben, einem Pseudo-Palindrom von »Diazo«, zwecks besserer Lesbarkeit mit einem eingeschobenen »l«. Der besondere Vorteil gegenüber den bisherigen, vergleichsweise ähnlichen Vorläuferverfahren: Kögel brachte die lichtempfindliche Diazoverbindung bereits gemeinsam mit der Kupplungskomponente auf einem Trägerpapier auf und unterband die Reaktion der beiden Stoffe durch einen Trick, der später erläutert wird. Entwickelt wurde das Bild durch gasförmigen Ammoniak. Die so erhaltene Kopie konnte man direkt nutzen – im Gegensatz zu früheren Verfahren, bei denen man die Abbilder mit Hilfe einer Lösung (»nasschemisch«) entwickelte. Per Diazotypie vervielfältigte man bis in die 1990er Jahre vor allem technische Zeichnungen, etwa in der Architektur.

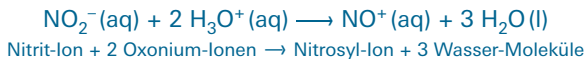
Um gewöhnliches Papier in Lichtpausenpapier zu verwandeln, tauchte man es in ein Bad, das die verschiedenen Komponenten enthielt. Für die Papiersorte Ozalid M nutzte man als Diazoniumverbindung 2-Diazo-1-naphthol-5-sulfonsäure und als Kupplungskomponente, mit der nach der Belichtung der Azofarbstoff entstehen sollte, Phloroglucin (1,3,5-Trihydroxybenzol). Der Name stammt aus dem Griechischen und deutet darauf hin, dass sich der Stoff beispielsweise aus der Rinde von Obstbäumen gewinnen lässt und süßlich schmeckt. Heute dient er nicht nur zur Herstellung von Azofarbstoffen, sondern auch als Wirkstoff in Medikamenten gegen Magen-Darm-Erkrankungen.

Will man selbst Diazotypie-Lichtpausenpapier herstellen, gelingt das etwa mit 5-Amino-2-methoxybenzoesäure als Ausgangsstoff. An der entstehenden Diazoniumverbindung lässt sich die Lichtempfindlichkeit besonders eindrucksvoll aufzeigen.

Zur Diazotierung von 5-Amino-2-methoxybenzoesäure löst man in einem Reagenzglas 0,04 Gramm davon in 2,5 Milliliter Natronlauge der Konzentration 2 mol/Liter. Diese braune Lösung stellt man in ein Eisbad. Anschließend löst man 0,02 Gramm Natriumnitrit ( $\text{NaNO}_2$ ) in einem Milliliter Wasser auf und gibt es hinzu. Ein zweites Reagenzglas mit 2,5 Milliliter Salzsäure der Konzentration 4 mol/Liter wird ebenfalls in das Eisbad gestellt. Nun tropft man das braune Gemisch unter schwachem Rühren zur Salzsäure hinzu. Die Temperatur in der Lösung darf nicht über 5 °C steigen. Die Lösung verbleibt mindestens 15 Minuten im Eisbad. Auch wenn nicht viel zu sehen ist – das Endgemisch ist immer noch durchscheinend braun –, hat sich chemisch eine Menge getan: Die Nitrit-Ionen haben in der insgesamt sauren Lösung sehr reaktive Nitrosyl-Ionen ( $\text{NO}^+$ -Ionen) gebildet.



**VERRÄTERISCHE BLÄSCHEN** Die Diazoniumsalz-Lösung vor (links) und nach mindestens fünfminütiger Bestrahlung mit UV-Licht (rechts, Wellenlänge 365 nm). Im rechten Reagenzglas sind die gebildeten Stickstoff-Gasbläschen deutlich erkennbar.



Die Nitrosyl-Ionen reagieren mit der Aminogruppe ( $\text{NH}_2$ -Gruppe) der 5-Amino-2-methoxybenzoesäure und bilden so das Diazonium-Kation. Dieser Vorgang wird als Diazotierung bezeichnet.

Die Lichtempfindlichkeit des Diazonium-Ions lässt sich nun eindrucksvoll in Szene setzen. Hierzu bringt man einen Tropfen der Lösung auf Filterpapier und bestrahlt es mit einer UV-Handlampe (Wellenlänge 365 Nanometer). Zunächst erscheint der feuchte, kreisrunde Fleck dunkler als seine Umgebung. Doch nach etwa einer halben bis einer Minute wird ein schwaches dunkelblaues Leuchten erkennbar, das sich in den nächsten zwei bis drei Minuten noch intensiviert und aufhellt (siehe »Leuchtende Botschaften«). Was wir beobachten, nennt sich Fluoreszenz: Ein Stoff strahlt Licht ab, nachdem er mit kurzwelligerer Strahlung angeregt wurde. Offensichtlich setzt das UV-Licht also eine chemische Reaktion (Photolyse) in Gang, aus der eine fluoreszierende Substanz hervorgeht.

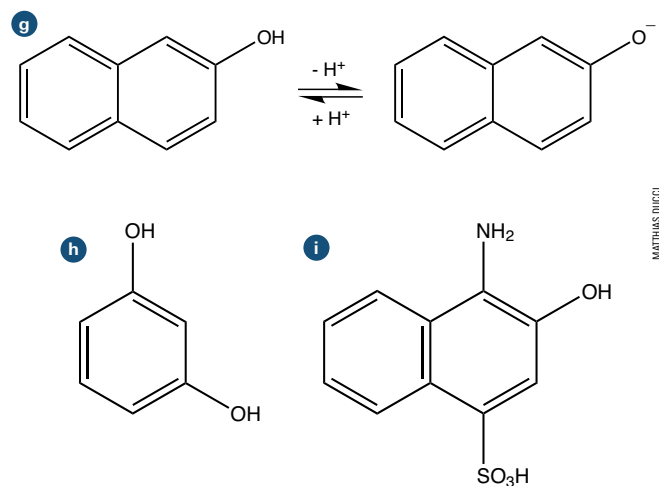
Eine weitere interessante Beobachtung liefert einen entscheidenden Hinweis auf den genauen Ablauf der Reaktion: Hierzu füllt man zwei bis drei Milliliter der Diazoniumsalz-Lösung in ein kleines Reagenzglas (etwa fünf Zentimeter lang und einen Zentimeter dick) und bestrahlt es mindestens fünf Minuten lang mit UV-Licht. Die Strahlungsquelle sollte nur wenige Zentimeter Abstand haben. Nachdem die UV-Lampe entfernt wurde, ist deutlich zu erkennen, dass sich kleinste Gasblasen in der Lösung an der Reagenzglaswand gebildet haben (»Verräterische Bläschen«). Da die Temperatur der Lösung gleich geblieben ist, lässt sich die Gasentwicklung nicht auf thermische Effekte zurückführen. Zudem treten die Bläschen nur auf der Seite auf, die der Strahlungsquelle zugewandt ist. Ein Blick auf die Strukturformel des Diazonium-Kations legt die Vermutung nahe, dass unter dem Einfluss

von UV-Licht das quasi vorgebildete Stickstoff-Molekül abgespalten wurde. Gleichzeitig lagert sich ein Wasser-Molekül an die freie Stelle an und spaltet im nächsten Schritt ein  $\text{H}^+$ -Ion unter Bildung einer Hydroxy-Gruppe (OH-Gruppe) ab (»Prinzip der Diazotypie«). Das Reaktionsprodukt, die 5-Methoxy-2-hydroxybenzoesäure, verursacht die blaue Fluoreszenz.

Die Photolyse lässt sich zur Bildgebung nutzen, indem vor der Bestrahlung eine Schablone auf ein mit der Diazoniumsalz-Lösung angefeuchtetes Filterpapier gelegt wird. Durch Bestrahlen entsteht ein Bild, das nach dem Entfernen der Schablone sichtbar ist (»Leuchtende Botschaften«). Allerdings verschwindet es wieder, je länger oder häufiger es unter UV-Licht betrachtet wird, da die zuvor abgedeckten Bereiche durch die nun auch hier stattfindende Photolyse ebenfalls zu fluoreszieren beginnen.

Um ein beständiges und bei Tageslicht sichtbares Bild zu erhalten, muss demnach in dem nicht bestrahlten Bereich eine Azosynthese stattfinden. Naheliegender wäre es, das bestrahlte Papier mit der Lösung eines Reaktionspartners (beispielsweise 2-Naphthol) zu besprühen, der mit den Diazonium-Ionen einen Azofarbstoff bildet. Doch dabei verläuft die Lösung, und es ergibt sich ein unscharfes Bild. Für dieses Problem hatte schon Kögel einen genialen Lösungsvorschlag: Er setzte der Diazoniumsalz-Lösung bereits vor dem Auftragen auf einem Trägermaterial den Reaktionspartner zu und unterdrückte die Azosynthese durch Weinsäure. Den Trick kann man am Beispiel von 2-Naphthol anschaulich machen (»Eine Frage der Kombination«): Im Säuren liegt das Gleichgewicht von

**EINE FRAGE DER KOMBINATION** Für die Azosynthese muss das reaktionsträge Molekül 2-Naphthol **g** erst durch Deprotonierung aktiviert werden (oben rechts). Dann kann es mit 5-Amino-2-methoxybenzoesäure zu einem roten Azofarbstoff reagieren. Wählt man Resorcin **h** an Stelle von 2-Naphthol als Kupplungspartner, entsteht eine gelbe Farbe. Aus der Kombination von Resorcin mit 1-Amino-2-naphthol-4-sulfonsäure **i** wiederum lässt sich ein Stoff gewinnen, der abhängig vom pH-Wert seine Farbe ändert.





**BERLIN, BERLIN** Das Brandenburger Tor erscheint direkt nach dem Bedampfen mit Ammoniak blau (hoher pH-Wert, links) und verfärbt sich anschließend nach einigen Minuten rotbraun (niedriger pH-Wert). Durch erneutes Bedampfen mit Ammoniak kehrt sich der Prozess wieder um.

**TOWER BRIDGE** Verwendete Schwarz-Farblos-Folie **j** und das davon mittels Diazotypie erhaltene Bild in rotem Azofarbstoff **k**. Das Bild zeigt die Tower Bridge in London.



2-Naphthol auf der linken und im Alkalischen auf der rechten Seite. Mit der OH-Gruppe (linke Seite) ist das Molekül für die Azosynthese jedoch nicht reaktiv genug. Das ändert sich, wenn der Stoff deprotoniert wird und sich das Naphtholat-Ion bildet (Abspaltung eines  $H^+$ -Ions; rechte Seite). Das kann man erreichen, indem man Ammoniak ( $NH_3$ ) zugibt.

Mit dieser Kenntnis lässt sich nun eine lichtempfindliche Lösung für die Diazotypie ansetzen. Hierzu braucht man drei Komponenten:

- 1 die Diazoniumsalz-Lösung,
- 2 eine Weinsäure-Lösung (0,5 Gramm in zwei Milliliter Wasser) und
- 3 eine alkalische 2-Naphthol-Lösung (0,04 Gramm in 2,5 Milliliter Natronlauge der Konzentration 2 mol/Liter).

Hat man diese hergestellt, mischt man 0,5 Milliliter der 2-Naphthol-Lösung mit 0,5 Milliliter der Weinsäure-Lösung und verrührt das Ganze gut. Es fällt ein fein verteilter Niederschlag aus (ein Teil der Weinsäure), der ignoriert werden kann. Erst anschließend gibt man 0,5 Milliliter der Diazoniumsalz-Lösung hinzu. Das Gemisch trägt man mit einem Borstenpinsel der Stärke 12 unmittelbar danach möglichst gleichmäßig auf das Papier auf. Das Gemisch reicht für zwei Zuschnitte von acht mal sechs Zentimeter. Das Papier sollte keinen oder nur sehr wenig optischen Aufheller enthalten – bewährt hat sich hierzu die Sorte »DFW Briefblock A4 Parchment«, die im Schreibwarenhandel erhältlich ist. Nach dem Trocknen mit einem Fön wird eine bedruckte Schwarz-Farblos-Folie mit Tesafilm eng auf dem Papier fixiert und mindestens 15 Minuten lang mit UV-Licht bestrahlt.

Um Schwarz-Farblos-Folien zu erhalten, können Farb-Bild-Dateien in Microsoft Paint geöffnet, als Monochrom-Bitmap gespeichert und auf Folie ausgedruckt werden (»Tower Bridge«, **j**; gegebenenfalls zuvor in Word kopieren und die Größe des Bildes anpassen).

Zum Entwickeln des Bilds füllt man zirka fünf Milliliter einer konzentrierten Ammoniak-Lösung in eine Petrischale (fünf Zentimeter breit und einen Zentimeter hoch), die in einer größeren Kristallisierschale (zehn Zentimeter breit und fünf Zentimeter hoch) steht. Letztere deckt man mit einem Uhrglas oder Ähnlichem ab. Aus der konzentrierten Lösung dampft gasförmiges Ammoniak aus, so dass sich die umgebende Atmosphäre damit anreichert. Mit einer



Pinzette hält man das belichtete Papier für mindestens drei Minuten in die Kristallisierschale. Schon nach wenigen Sekunden erscheint das Bild schwach rot und färbt sich zunehmend intensiver (»Tower Bridge«, **k**).

Die Bildentwicklung resultiert aus der Reaktion der Diazonium-Ionen mit 2-Naphtholat-Ionen zu einem roten Azofarbstoff: der Azokupplung (»Prinzip der Diazotypie«, S. 52, rechts).

Mit anderen Kupplungskomponenten als 2-Naphthol lassen sich Bilder in weiteren Farben erstellen. So ergibt die Synthese von 5-Diazo-2-methoxybenzoesäure mit Resorcin (1,3-Dihydroxybenzol) einen gelben Azofarbstoff (»La Tour Eiffel«, **b**, S. 53). Hierzu ersetzt man die Komponente **3** durch eine alkalische Resorcin-Lösung (0,03 Gramm Resorcin in 2,5 Milliliter Natronlauge der Konzentration 2 mol/Liter lösen). Darüber hinaus muss die Weinsäure-Lösung **2** etwas konzentrierter sein (0,75 Gramm Weinsäure in zwei Milliliter Wasser lösen). Bei Tageslicht übersieht man auf Grund des schwächeren Figur-Hintergrund-Kontrasts leicht viele Details. Sie werden deutlicher sichtbar, wenn man das Bild unter UV-Beleuchtung betrachtet, denn sowohl das Zerfallsprodukt 5-Hydroxy-2-methoxybenzoesäure als auch 2-Naphthol fluoreszieren in den belichteten Bereichen, nicht aber der gelbe Azofarbstoff (»La Tour Eiffel«, **c**).

Viele Azofarbstoffe dienen als Säure-Base-Indikatoren, ihre Farbe ändert sich also mit dem pH-Wert des umge-

benden Mediums. Kann man mit diesem Wissen durch Diazotypie ein Bild herstellen, das in saurer oder alkalischer Umgebung seine Farbe wechselt? Bekannte Beispiele für derartige Indikatoren sind Methylorange und Methylrot. Für ihre Herstellung ist allerdings das giftige und potenziell krebserregende N,N-Dimethylanilin notwendig. Die Idee lässt sich aber mit einem anderen Azofarbstoff umsetzen. Um ihn zu erhalten, lässt man 1-Amino-2-naphthol-4-sulfonsäure (»Eine Frage der Kombination«) mit Resorcin reagieren. Dazu benötigt man drei Lösungen:

- 1** 0,06 Gramm 1-Amino-2-naphthol-4-sulfonsäure in 2,5 Milliliter Natronlauge der Konzentration 2 mol/Liter lösen und gemäß der obigen Vorschrift diazotieren,
- 2** eine Weinsäure-Lösung (0,25 Gramm in 2 Milliliter Wasser lösen) und
- 3** eine alkalische Resorcin-Lösung (0,03 Gramm in 2,5 Milliliter Natronlauge der Konzentration 2 mol/Liter lösen).

Die Lichtpause hat während ihrer Entwicklung in Ammoniak-Atmosphäre eine blaue Farbe. Diese geht nach einigen Minuten ins Rotbraune über, da Ammoniak aus dem Papier ausdampft und der pH-Wert somit sinkt (siehe »Berlin, Berlin«). Hält man das Papier erneut in die Ammoniak-Atmosphäre, wird das Bild wieder blau. ◀

#### QUELLE

**Ducci, M.:** Diazotypie – ein bildgebendes Verfahren mit Diazoniumsalzen. CHEMKON (zur Veröffentlichung angenommen)

## Die Spektrum eLearningFlat



Mit der **eLearningFlat** erhalten Sie Zugriff auf eine Auswahl von sechs bis zu 40-minütigen E-Learning-Kursen aus dem Programm von iversity/SpringerNature.

Jeden Monat wird ein Kurs ausgetauscht, so dass Sie jährlich auf bis zu zwölf Kurse zugreifen können.

€ 99,- im Jahresabo oder € 8,99 im jederzeit kündbaren Monatsabo.

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



# ASTRONOMIE RÜTTELN AM KOSMOLOGISCHEN PRINZIP

**Moderne Modelle des Weltraums beruhen auf der Annahme, dass er im Großen und Ganzen überall gleich beschaffen sein sollte. Manche Beobachtungen scheinen dem aber zu widersprechen.**



**Charlie Wood** ist Physiker und Wissenschaftsjournalist. Er schreibt regelmäßig für das »Quanta Magazine«.

» [spektrum.de/artikel/2008768](https://spektrum.de/artikel/2008768)

10465300 ly



**KARTIERTE WEITEN** Bei Vermessungen über sehr viele Galaxien hinweg wirken die Bestandteile des Alls relativ gleichmäßig verteilt.

## AUF EINEN BLICK WINDSCHIEFES WELTMODELL

- 1** Das Universum sollte von jedem Ort aus und in alle Blickrichtungen im Wesentlichen gleich aussehen. Erst unter dieser Voraussetzung gelten viele Schlussfolgerungen zur kosmischen Entwicklung.
- 2** Einzelnen Beobachtungen zufolge könnte es allerdings große Strukturen und Anomalien geben, die sich nicht durch zufällige Verteilungen erklären lassen.
- 3** Solche Befunde sind heftig umstritten, doch es sammeln sich umso mehr, je genauer die Himmelsdurchmusterungen werden. Bislang konnte keiner die Forschungsgemeinschaft überzeugen.

Die leicht gebogene Reihe von Punkten scheint geradezu ein spöttisches Grinsen zu zeichnen. Es wirkt, als wüsste sie, dass sie die Grundfesten der Kosmologie erschüttern kann. Bei der Anordnung, die Alexia Lopez von der englischen University of Central Lancashire im Juni 2021 auf der Tagung der American Astronomical Society vorgestellt hat, handelt es sich um einen Bogen von Galaxien, der den Himmel über eine Strecke von 20 Vollmond-durchmessern überspannt. Er hat eine geschätzte Ausdehnung von 3,3 Milliarden Lichtjahren und ist damit selbst für die Maßstäbe des Universums überraschend groß (siehe »Bogen der Unmöglichkeit«). »So gewaltig, dass er mit unseren gegenwärtigen Vorstellungen nur schwer zu erklären ist«, führte Lopez während ihrer Präsentation aus.

Die Doktorandin Lopez hat den Bogen bei der Auswertung von Beobachtungsdaten entdeckt. Er scheint einer Grundannahme der Astronomie zu widersprechen: Das Universum hat auf hinreichend großen Skalen nirgends herausstechende Merkmale. Egal, von welchem Standpunkt aus und in welche Richtung man es betrachtet: Man sieht ungefähr das gleiche Bild.

Diese Hypothese, laut der alle Materie und Galaxien gleichmäßig verteilt sind, heißt kosmologisches Prinzip. Dank ihr können wir ausgehend von dem, was von uns aus sichtbar ist, weit reichende Schlussfolgerungen über das gesamte Universum ziehen. Was aber, wenn es sich als falsch herausstellen sollte? Dann, so Ruth Durrer von der Universität Genf, die sich mit den Strukturen des Weltalls befasst, »müssen wir viele unserer Messungen neu durchführen oder ganz anders interpretieren«.

Als tragende Säule der modernen Astronomie ist das kosmologische Prinzip immer wieder unter Druck gekommen. Einige derjenigen, die es in Frage stellen, finden auffällige Materiekonzentrationen in gewissen Bereichen suspekt. Dazu gehören Lopez und ihr Doktorvater Roger Clowes sowie ihr US-Kollege Gerard Williger von der University of Louisville, mit dem gemeinsam sie die Entdeckungen ausgewertet haben. Andere Fachleute hinterfragen grundsätzlich die sonst breit akzeptierte Ansicht, der Großteil der Bestandteile des Universums verberge sich in Form von so genannter Dunkler Materie und Dunkler Energie vor unseren Instrumenten. Die Abweichler glauben, die Theorien unterlägen hier einem Trugbild, das aus einer allzu einfachen Konstruktion der Modelle entspringt.

Unabhängig von ihrer Motivation sind sich jedenfalls die meisten einig, dass das kosmologische Prinzip angesichts seiner grundlegenden Bedeutung eine Überprüfung wert ist. Bisher hat jedoch noch kein vermeintlicher Fund es nachhaltig in Bedrängnis gebracht, seien es unverhältnismäßig große Strukturen oder andere Anomalien. »Wir versuchen, so viele Ungereimtheiten wie möglich zu finden«, fasst Seshadri Nadathur vom University College London die Situation zusammen, »und sind gleichzeitig sehr skeptisch, wenn jemand behauptet, tatsächlich eine entdeckt zu haben.«

Historisch lässt sich das kosmologische Prinzip bis zum 1543 veröffentlichten Hauptwerk von Nikolaus Kopernikus zurückverfolgen, laut dessen Weltbild die Erde nicht im

Zentrum der Schöpfung liegt. Die Vorstellung, unser Planet umkreise vielmehr die Sonne, stand am Anfang einiger revolutionärer Perspektivwechsel hinsichtlich der Stellung des Menschen. Im 19. Jahrhundert galt bereits die Sonne nur noch als ein Stern unter vielen ähnlichen. Im darauf folgenden Jahrhundert entdeckten Astronomen dann unzählige Galaxien jenseits unserer eigenen. »Wir sind nichts Ungewöhnliches«, resümiert Andrew Howell von der University of California in Santa Barbara. »Das Universum sagt uns das immer wieder.«

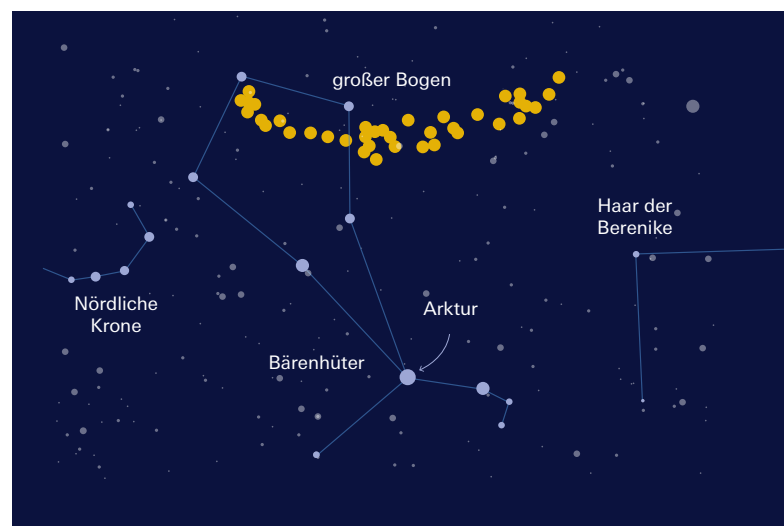
Nicht nur ist die Erde nicht besonders, sondern überhaupt nichts ist es, nirgends. Über die vergangenen Jahrzehnte haben astronomische Untersuchungen das kosmologische Prinzip in zweierlei Hinsicht gefestigt. Einerseits ermöglichten leistungsstarke Teleskope immer tiefere Blicke in die Dunkelheit des Alls. Selbst weit entfernte Galaxien tauchten stets in vergleichbarer Menge auf. Der Kosmos scheint homogen zu sein, die Materie ist also entlang jedes Streckenabschnitts gleichmäßig verteilt. Andererseits ist das Universum isotrop, das heißt, es hat in jeder Richtung die gleichen Eigenschaften und zeigt ein ähnliches Bild.

### Das All wird zur Flüssigkeit

Dank seiner Homogenität und Isotropie ist der Kosmos leichter zu analysieren. Seine Vergangenheit lässt sich rekonstruieren – und die Zukunft voraussagen –, indem man das so genannte Standardmodell zu Grunde legt, das vor allem auf Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie beruht. Diese beschreibt das Zusammenspiel von Materie und der Raumzeit. Sie umfasst jedoch so viele miteinander verknüpfte Gleichungen und Variablen, dass exakte Lösungen schnell unpraktikabel werden.

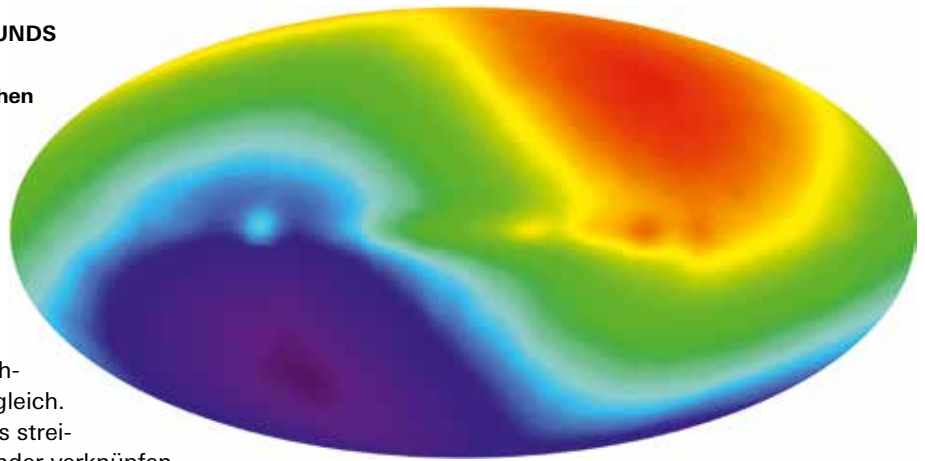
Das kosmologische Prinzip hilft bei der Vereinfachung der Berechnungen, indem es ermöglicht, das All in gewisser Weise als eine glatte und symmetrische Flüssigkeit zu behandeln. Materiekumpen wie Galaxien werden dabei

**BOGEN DER UNMÖGLICHKEIT** Eine ausgedehnte Ansammlung von Galaxien scheint sich nicht mit der kosmologischen Grundannahme gleichmäßig verteilter Materie vereinbaren zu lassen. Wäre der große Bogen mit bloßem Auge zu erkennen, würde er sich über einen weiten Bereich des Himmels erstrecken – und das, obwohl er enorme 9,2 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt ist.



## DIPOL DES MIKROWELLENHINTERGRUNDS

Die Strahlung, die den Kosmos seit dem Urknall erfüllt, scheint von uns aus gesehen in einer Richtung zu roten Wellenlängen verschoben und in der entgegengesetzten bläulicher. Das zeigt diese Aufnahme des Satelliten Cosmic Background Explorer (COBE) des gesamten Himmels aus den frühen 1990er Jahren.



NASA / GSFC / COBE

ignoriert, und die fortwährende Ausdehnung verläuft in alle Raumrichtungen gleich. So lassen sich Teile des Formelsystems streichen und einige der Variablen miteinander verknüpfen. Dann wird die zeitliche Entwicklung mit nur zwei Gleichungen beschreibbar: den Friedmann-Gleichungen, die der russische Physiker Alexander Friedmann 1922 unter den Annahmen des kosmologischen Prinzips hergeleitet hat. Es ist ein bisschen so, als wolle man das Volumen der Erde berechnen. Dabei könnte man sich mit jedem Berg und jedem Tal abmühen, oder man gibt sich damit zufrieden, dass der Planet näherungsweise kugelförmig ist.

Mit der zunehmend genauen Kartierung des Himmels fragen sich viele allerdings, ob solche Vereinfachungen nicht zu weit gehen. Ebenso wenig, wie die Erde eine Kugel ist (selbst, wenn man ihre Oberfläche glättet, ist sie durch ihre Rotation immer noch am Äquator ausgebaucht), könnten ausgedehnte Strukturen oder Asymmetrien im Universum bessere Rückschlüsse auf dessen Alter, Verhalten und Zusammensetzung zulassen. Zu denjenigen, die davon überzeugt sind, Friedmanns monotoner Kosmos müsse überwunden werden, gehört Thomas Buchert von der französischen Universität Claude-Bernard Lyon 1: »Es ist seltsam, dass dieses Standardmodell weiterhin so lebendig ist.«

Der große Bogen und weitere Strukturen rütteln an der ersten Säule des kosmologischen Prinzips, der Homogenität. Zwar ist das Universum nach menschlichen Maßstäben nicht homogen. Wer plötzlich auch nur ein Lichtjahr von hier weg teleportiert würde, hätte eine abrupt verkürzte Lebenserwartung. Befände sich jedoch ein Weltraumteleskop irgendwo anders im Universum, würde es immer noch vertraut aussehende Bilder zahlloser Galaxien aufnehmen. In gewisser Hinsicht behandelt das kosmologische Prinzip den Weltraum wie die Luft in einem Ballon. Auf mikroskopischer Ebene interagieren die Moleküle beim Aufblasen auf komplizierte Weise. Aus der Ferne betrachtet dehnt sich aber bloß ein unscheinbares Gas aus, zu dessen Charakterisierung wenige Eigenschaften wie Druck und Temperatur genügen, die sich ständig ändern.

Systematische Himmelsdurchmusterungen haben ergeben, dass jeder Fleck im Weltraum, der mindestens einige hundert Millionen Lichtjahre umfasst, ungefähr die gleiche Menge an Materie enthält. Daher kommen Strukturen wie der große Bogen, der sich über Milliarden von Lichtjahren erstreckt, so unerwartet wie ein dichter Gas-kumpen in einem sonst gewöhnlichen Luftballon.

Schon 2013 wurde ein potenzieller Ausreißer identifiziert. Damals schien eine über vier Milliarden Lichtjahre verteilte Gruppierung leuchtender Galaxienkerne, so genannter Quasare, »eine Herausforderung für die Annahme des kosmologischen Prinzips« zu werden, wie das für die Entdeckung verantwortliche Team in seiner Veröffentlichung schrieb. Nur wenige andere waren davon überzeugt. Seshadri Nadathur wollte beispielsweise herausfinden, ob eine scheinbare Megastruktur allein durch Zufall zu Stande kommen kann. Er simulierte digitale Universen, deren Galaxien völlig willkürlich verstreut waren. Als er dort ein Programm nach Häufungen suchen ließ, entdeckte es tatsächlich Muster von der Größe der Quasar-Gruppe. Umfangreichere Berechnungen auf Grundlage des Standardmodells, bei denen sich die Galaxien mit der Zeit auf Grund der Schwerkraft näher beieinander gruppieren, würden sogar noch ausgeprägtere Anhäufungen enthalten. Laut Nadathurs Arbeit bietet das kosmologische Prinzip viel Spielraum. Riesige Strukturen seien zwar selten, betont er, aber das Standardmodell »sagt nicht, dass die Wahrscheinlichkeit dafür in jedem Maßstab gleich null sein muss«.

## Wie ein steter Strom im Weltraum

So wäre laut Nadathur ein überzeugenderes Argument für eine Inhomogenität des Alls, wenn die Materie auch bei immer größeren Maßstäben eine gewisse Klumpigkeit beibehielte. Bisherige Studien haben jedoch durchweg ergeben, dass das Universum umso gleichmäßiger erscheint, je weiter man herauszoomt. Durrer zufolge sind scheinbar unmögliche Strukturen wohl durch einfache Statistik erklärbar. »Wenn man sehr viele Beobachtungen anstellt, werden immer einige darunter sein, die an sich nicht sehr wahrscheinlich sind«, sagt sie. »Darüber mache ich mir keine großen Sorgen.«

Nehmen wir an, das Universum wäre wirklich homogen. Dann könnte es darin dennoch eine bevorzugte Richtung geben, eine Anisotropie. In einem solchen Kosmos würde Materie wie unter einem steten Windhauch von einer Seite zur anderen fließen.

Allerdings gibt es ein starkes Indiz gegen jede Art von derartiger Strömung, und zwar das Nachglühen des Urknalls. Dieser so genannte kosmische Mikrowellenhinter-

grund (CMB, nach dem englischen Begriff cosmic microwave background) hat eine im Wesentlichen überall gleichmäßige Durchschnittstemperatur von 2,725 Grad über dem absoluten Nullpunkt. Zur Berechnung jener Temperatur müssen die Fachleute jedoch ein leichtes Ungleichgewicht von den Rohdaten abziehen. In Richtung des Sternbilds Wassermann ist der CMB einen Bruchteil eines Grads wärmer, an der entgegengesetzten Seite des Himmels entsprechend kälter (siehe »Dipol des Mikrowellenhintergrunds«).

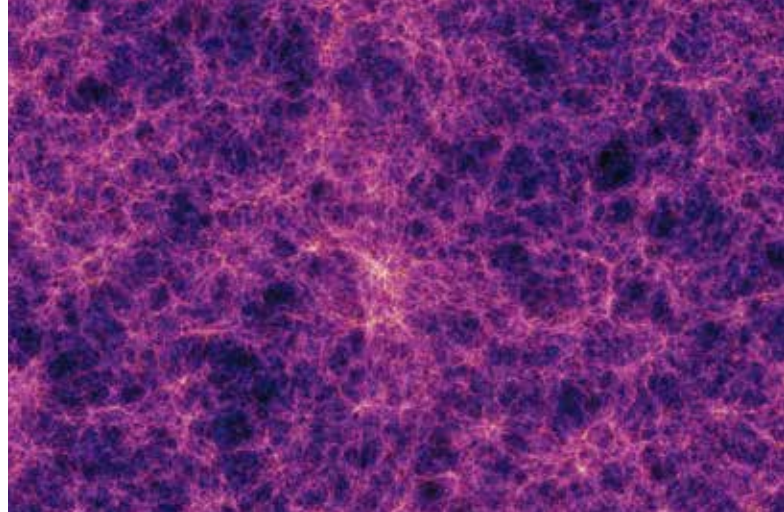
Gemeinhin wird diese Beobachtung als Folge der Eigenbewegung des Sonnensystems interpretiert, unserer so genannten Pekuliargeschwindigkeit. Die Sonne umkreist das Zentrum der Milchstraße, und Letztere wiederum bewegt sich auf nahe gelegene Galaxien zu. So driften wir unter dem Strich mit etwa 300 Kilometern pro Sekunde relativ zum CMB. Uns erscheinen einfallende Mikrowellen des Hintergrundsignals entsprechend gestreckt und gestaucht. Dieser lokale Effekt stellt für das kosmologische Prinzip kein Problem dar.

Aber möglicherweise erklärt die Pekuliargeschwindigkeit die Verzerrungen im CMB nicht vollständig. Die Verschiebung könnte zum Teil auf eine Anisotropie des gesamten Universums zurückzuführen sein. Wenn das der Fall ist, dürfte die Messung unserer Drift relativ zum CMB ein anderes Ergebnis liefern als jener im Vergleich zu weit entfernten Galaxien. Denn diese sollten sich ihrerseits gegenüber dem Mikrowellenhintergrund bewegen.

Mehrere Teams haben solche Messungen vorgenommen und sind dabei tatsächlich auf Ungereimtheiten gestoßen. So veröffentlichte eine internationale Forschungsgruppe im Februar 2021 ihre Berechnungen zur Relativgeschwindigkeit gegenüber mehr als einer Million Quasare in großer Distanz. Die Verzerrung stimmt insgesamt mit dem Ungleichgewicht im CMB überein, ist aber doppelt so ausgeprägt. Eine Interpretation: Die Erde treibt mit etwa 600 Kilometern pro Sekunde relativ zu den Quasaren, die ihrerseits gegen den CMB strömen.

Subir Sarkar von der University of Oxford gehört zu dem Team, das die Untersuchung durchgeführt hat. Er bezeichnet die Diskrepanz als »heftigen Schlag« für das Standardmodell und dessen Annahme eines isotropen Universums. Auch weist er auf Spekulationen hin, denen zufolge sich außerhalb des beobachtbaren Alls eine riesige Materiewolke befindet. Sie würde mit ihrer Gravitation alles zu sich hinziehen. Wir sehen indes nur den Teil des Weltraums, dessen Licht uns seit dem Urknall erreichen konnte. »Wir wissen nicht, was da draußen ist, und dort gibt es eine Menge«, bekräftigt Sarkar. Das wäre nicht mit der weithin akzeptierten Theorie vereinbar, laut der sich alles in den ersten Momenten inflationär aufblähte und dadurch gewissermaßen glatt gezogen wurde, und zwar noch weit jenseits des uns zugänglichen Bereichs.

Die meisten bezweifeln jedoch, dass die Entdeckung der Quasare so weit gehende Schlussfolgerungen rechtfertigt. Mehrere befragte Fachleute betonten verschiedene technische Herausforderungen bei der Analyse, etwa die ungleichmäßige Verteilung der Quasare. Sie würden einen direkten Vergleich mit dem CMB erschweren. »Derlei



### **KOSMISCHES NETZ Computersimulationen liefern einen Eindruck davon, wie sich dichte Fäden aus Materie über hunderte Millionen Lichtjahre spinnen.**

Studien sind methodisch ziemlich kompliziert«, mahnt die Astrophysikerin Tamara Davis von der University of Queensland in Australien.

Ruth Durrer bezeichnet die Hinweise durch die Quasare ebenfalls als noch nicht schlüssig und meint, sie bliebe hier lieber unvoreingenommen. Gemeinsam mit ihrer Kollegin Hamsa Padmanabhan und ihren Kollegen Tobias Nadolny und Martin Kunz hat sie im November 2021 eine alternative Messstrategie publiziert. Sie kombiniert verschiedene Arten, auf die unsere Pekuliargeschwindigkeit das Erscheinungsbild entfernter Galaxien verändern könnte. Laut den Erkenntnissen des Teams dürften neue Observatorien noch in diesem Jahrzehnt Präzisionstests der Isotropie und des kosmologischen Prinzips ermöglichen. Durrer ist optimistisch: »Wir werden in der Lage sein, die Frage zu klären.«

### **Abkehr vom gleichförmigen Universum**

Um den immer genaueren Durchmusterungen des Universums gerecht zu werden, gehen bei vielen Modellen inzwischen geringfügige Schwankungen der Materiekonzentration in die sonst gleichmäßig verteilte kosmische Flüssigkeit ein. Das ist ein wenig, als würde man eine Berechnung des Erdvolumens verbessern, indem man markante Gebirgszüge wie den Himalaja berücksichtigt. »Man macht sich das Leben wieder etwas komplizierter«, erläutert Seshadri Nadathur, »aber lässt dabei die Komplikationen auf eine kontrollierte Weise zu.«

Einige, wie der französische Kosmologe Buchert, wünschen sich jedoch eine nachdrücklichere Abkehr von der Annahme eines gleichförmigen Universums. Zu diesem Zweck hat Buchert Jahrzehnte damit verbracht, ein »hintergrundfreies« kosmologisches Modell zu entwickeln.

Eigentlich hat bereits Einsteins allgemeine Relativitätstheorie mit der klassischen Vorstellung fester Bezugspunkte aufgeräumt, denen gegenüber man alle Entfernungen und Bewegungen absolut messen kann. Sie besagt stattdessen, dass sich die Raumzeit um die Materie herum verbiegt. Dementsprechend lässt das Standardmodell eine gewisse Krümmung der Raumzeit zu, nutzt zugleich allerdings das kosmologische Prinzip, um die lokalen Auswirkungen klein und die Expansion insgesamt gleichmäßig zu

halten. So entsteht letztlich doch wieder ein Hintergrund, der die Berechnungen auf großen Skalen vereinfacht.

Buchert verzichtet bei seiner Arbeit auf solch einen universellen Bezugsrahmen. Stattdessen unterteilt er den Kosmos in Abschnitte und mittelt die Menge der Materie und die daraus resultierende Krümmung der Raumzeit in jeder Region. Diesen Durchschnittswert betrachtet er dann als lokalen Hintergrund, vor dem er alle Phänomene interpretiert, die innerhalb jenes Teils auftreten. Der Ansatz hat zu einem unerwarteten Ergebnis geführt.

1998 stellten Astrophysiker bei der Untersuchung ferner Supernovae fest, dass sich das Universum mit der Zeit schneller auszudehnen scheint. Der revolutionäre Befund wurde 2011 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet und hat weit reichende Folgen. Ihm zufolge drückt eine mysteriöse Energieform, die Dunkle Energie, die Galaxien stärker voneinander weg, als die wechselseitige Anziehung über die Schwerkraft sie zusammenbringen kann.

Bucherts Analysen zufolge gibt es für den Effekt eine alternative Erklärung. Im Vergleich zum dichten Netz aus Bereichen, die viele Galaxien beherbergen, dehnen sich dazwischen gelegene »Voids« schneller aus, da sie weniger Materie enthalten, die sich selbst gravitativ abbremst. Die Regionen mit relativ dünn verteilten Galaxien wachsen schneller, und so wird das Universum insgesamt leerer. Deswegen nimmt seine Expansionsrate zu. Laut Buchert kann dieser Rückreaktion (englisch: backreaction) genannte Effekt die beschleunigte Ausdehnung des Universums erklären, ohne dafür eine Dunkle Energie heranzuziehen.

Tatsächlich halten andere Fachleute die Herangehensweise für mathematisch solide und die Rückreaktion für ein reales Phänomen. Die Frage ist aber, ob seine Auswirkungen stark genug sind. Auf der Suche nach einer Antwort haben Durrer und mehrere Kollegen eine groß angelegte Simulation durchgeführt. Sie erstellten ein digitales Universum und berechneten, wie sich unterschiedliche Expansionsraten in Voids und Galaxienhaufen auf den Weg von Licht auswirken würden, das ein zufällig platzierter Beobachter messen würde. Im Juli 2019 veröffentlichte das Team das Ergebnis: Die Rückreaktion verfälscht in dem Szenario die Messung der beschleunigten Ausdehnung um etwa zwei Prozent. Anders formuliert sagt das Standardmodell eine zu 98 Prozent stimmige Expansion voraus, und die Rückwirkung allein kann nur schwer für die Dunkle Energie herhalten. »Der Konsens lautet im Moment, dass es sich um einen kleinen Effekt handelt, der letztlich nicht allzu viele Probleme bereitet«, so Nadathur.

Trotzdem erweisen sich diese zwei Prozent vielleicht als folgenreich, denn die Rückreaktion könnte ein Spannungsfeld in der Kosmologie befrieden. Die »Hubble-Krise« dreht sich um den Umstand, dass sich das nahe Universum allem Anschein nach um rund ein Zehntel schneller ausdehnt als das Weltall insgesamt. Viele Erklärungen wurden ins Spiel gebracht, darunter auch radikale Ansätze mit ganz neuen fundamentalen Wechselwirkungen. Womöglich steckt hinter der Diskrepanz aber vielmehr schlicht die grobe, unscharfe Natur des kosmologischen Prinzips. In einem Universum mit hier und dort verteilten Materiekumpen wäre durchaus zu erwarten, dass leerere Bereiche

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema: [spektrum.de/t/kosmologie](https://spektrum.de/t/kosmologie)



YURIY MAZUR / STOCK.ADOBE.COM

rascher anwachsen als der Durchschnitt. 2020 hat Buchert gemeinsam mit seiner Kollegin Asta Heinesen aus Lyon berechnet, dass Inhomogenitäten für die Unterschiede sorgen und die Hubble-Krise lösen könnten.

Durrer simuliert ebenfalls die Auswirkungen ungleichmäßig verteilter Materie und untersucht, mit welcher Wahrscheinlichkeit wir zufällig in der Mitte eines leeren Volumens gelandet sind. »Selbst wenn die Rückreaktion nicht ausreicht, um die beschleunigte Expansion zu erklären, könnte sie immerhin im Fall der Hubble-Krise helfen«, sagt Durrer. Allerdings erwartet sie von dem Effekt auch hier keine vollständige Lösung. Falls die Rückreaktion eine Rolle spielt, wäre das dennoch der erste größere Fall, bei dem das kosmologische Prinzip unser Verständnis lange eher behindert als gefördert hätte. Sonst scheint seine Vorhersagekraft aber trotz allem recht gut zu sein. »Nach unserem derzeitigen Kenntnisstand ist das Universum wirklich überall homogen und isotrop«, betont Nadathur.

Letztlich bleibt es schwierig, Schlüsse zu ziehen. Schließlich befinden wir uns im Hier und Jetzt. Besonderheiten unserer Perspektive lassen sich nur allzu leicht mit Schwächen des kosmologischen Prinzips verwechseln. »Fast jeder Effekt, der einem in die Quere kommen kann«, meint Andrew Howell, »liegt daran, dass wir eben nur diesen einzigartigen Blickwinkel auf das Universum haben.« ◀

### QUELLEN

**Adamek, J. et al.:** Bias and scatter in the Hubble diagram from cosmological large-scale structure. *Physical Review D* 100, 2019

**Buchert, T.:** On average properties of inhomogeneous fluids in general relativity: Dust cosmologies. *General Relativity and Gravitation* 32, 2000

**Lopez, A. M. et al.:** A giant arc on the sky. *ArXiv* 2201.06875, 2022

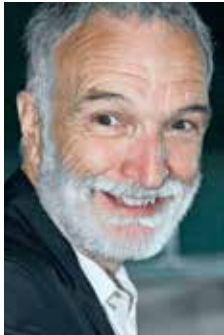
**Nadolny, T. et al.:** A new way to test the cosmological principle: Measuring our peculiar velocity and the large-scale anisotropy independently. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2021, 2021

**Secrest, N. J. et al.:** A test of the cosmological principle with quasars. *The Astrophysical Journal Letters* 908, 2021

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Cosmologists Parry Attacks on the Vaunted Cosmological Principle« 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.



# SCHLICHTING! UNSCHEINBARE GRENZE IM FLUSS



**Manchmal steht ein winziger solitärer Wellenkamm quer über einem Gewässer. Er trennt eine bewegte von einer ruhigen Zone und gibt interessante physikalische Zusammenhänge preis.**

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/2008771](http://spektrum.de/artikel/2008771)

**Es ist nicht wichtig, was du betrachtest, sondern, was du siehst**

Henry David Thoreau (1817–1862)

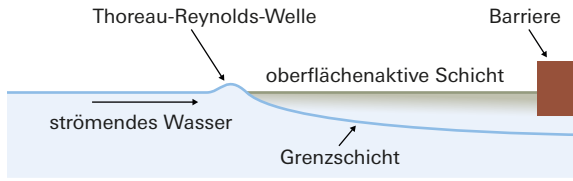
▶ Wer einen Spaziergang an einem Bach unternimmt, sollte es nicht versäumen, dessen Oberfläche nach einer unauffälligen, nahezu fadenförmigen Welle abzusuchen. Sie läuft in den meisten Fällen wie eine dünne Linie senkrecht zur Strömungsrichtung über das Gewässer und zeichnet bei Sonnenschein einen feinen Streifen fokussierten Lichts auf den Boden (siehe »Kleiner Wellenkamm«). Wenn man die filigrane Struktur zum

Beispiel mit dem Finger stört, bildet sie sich anschließend unwesentlich verändert wieder neu. Der winzige Wall und vor allem sein Umfeld sind nicht nur schön anzusehen. Die Erscheinung deutet auf ein komplexes Strömungsgeschehen hin, von dem man direkt kaum etwas zu sehen bekommt.

Diese Art von Welle wurde zum ersten Mal 1854 vom US-Schriftsteller und Philosophen Henry David Thoreau beschrieben. Sie hat später Generationen von Forschern zu experimentellen und theoretischen Untersuchungen angeregt, beginnend 1881 mit dem britischen Physiker Osborne Reynolds. In englischsprachigen Publikationen wird sie daher meist als »Reynolds ridge« bezeichnet. Hinter der Thoreau-Reynolds-Welle steckt ein subtiles

**KLEINER WELLENKAMM** Die Thoreau-Reynolds-Welle steht senkrecht zur Fließrichtung. Am Boden ruft ein Teil von ihr unter Sonnenlicht eine helle Brennlinie (Kautik) hervor.





**AUFGESTELLTER GRAT** Der Wasserstrom taucht an der oberflächenaktiven Schicht ab. Die Reibung in der Grenzschicht wölbt in der Eintrittszone eine winzige Welle auf.

Zusammenspiel von Oberflächen- und Strömungseffekten. Es beginnt mit einer Barriere, die sich in einem Fluss gebildet hat, wenn etwa ein Ast quer darauf liegt oder Unrat stecken bleibt. Daran stauen sich natürliche Tenside und Eiweiße aus Pflanzenrückständen. Das Material verändert die physikalischen Eigenschaften der Wasseroberfläche. Die Moleküle streben dorthin und ordnen sich mit einem hydrophilen Ende im Wasser und einem hydrophoben in der Luft an. Das setzt die Spannung der obersten Wasserschicht herab, die nun auseinanderstrebt und sich sozusagen dagegen wehrt, erneut zusammengedrückt zu werden. Die Lage aus mikroskopischen Verunreinigungen wirkt anschaulich gesprochen wie ein unsichtbares fixiertes Brett auf das ankommende Wasser. Dieses kann nur dadurch ausweichen, dass es auf seinem weiteren Weg darunter hinwegtaucht.

Zwischen dem in die Tiefe abgelenkten Strom und dem starren Oberflächenfilm gibt es eine Grenzschicht, die das darauf folgende Geschehen maßgeblich bestimmt. Normalerweise spielt in laminar fließendem Wasser dessen Zähigkeit so gut wie keine Rolle. In der Grenzschicht haften die benachbarten Elemente jedoch direkt am Verunreinigungsfilm, und nach außen hin passt sich die Geschwindigkeit immer mehr der Hauptströmung an. Infolge des dadurch hervorgerufenen Reibungswiderstands baut sich im nachkommenden Volumen auf kurzer Strecke ein erhöhter Druck auf. Das hebt an der Wasseroberfläche unmittelbar vor der Vorderkante der molekularen Verschmutzungen – also dort, wo das Wasser abtaucht – einen schmalen Bereich auf dessen ganzer Breite um knapp einen Millimeter an. Diese Erhebung ist die Thoreau-Reynolds-Welle.

Natürliche Gewässer führen fast ständig oberflächenaktive Substanzen mit sich. Darum gibt es den Wall trotz seiner geringen Bekanntheit recht häufig. Vermutlich zieht er selten Aufmerksamkeit auf sich, da sowohl er als auch die Fläche mit den angestauten Chemikalien unauffällig sind und sich in einem Abstand von der ursprünglichen Barriere befinden.

Ein solches Hindernis muss nicht besonders groß sein, um passendes Material aufzuhalten. Oft genügt dazu schon ein Schilfhalm oder ein kleiner Zweig. Letztlich ist die Thoreau-Reynolds-Welle selbst ein untrüglicher

MIT FREIL. GEN. VON HARALD BERNER



**KAPILLARWELLEN** Bei ausreichender Geschwindigkeit können sich stromaufwärts vor der Grenzlinie feine Rippel bilden. Auf der Seite zur Barriere lässt die Oberflächenzusammensetzung das nicht zu.

Hinweis auf einen weitgehend ruhenden Bereich. Sie ist so etwas wie eine Demarkationslinie zur bewegten Umgebung.

Die Erscheinung kann sogar in stehenden Gewässern beobachtet werden. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn ein gleichmäßiger Wind obenauf treibendes Material zum Rand einer Pfütze hin zusammenfegt. Das auf die Weise gereinigte übrige Oberflächenwasser bewegt sich ebenfalls in die Richtung und findet eine ähnliche Situation vor wie im blockierten Fluss. Es prallt auf den Schmutzfilm und taucht vor ihm ab – in dem Fall nicht darunter hindurch, sondern als bodennahe Unterströmung wieder zurück. So entsteht ein geschlossener Kreislauf, der im Idealfall so lange bestehen bleibt, wie der Wind weht.

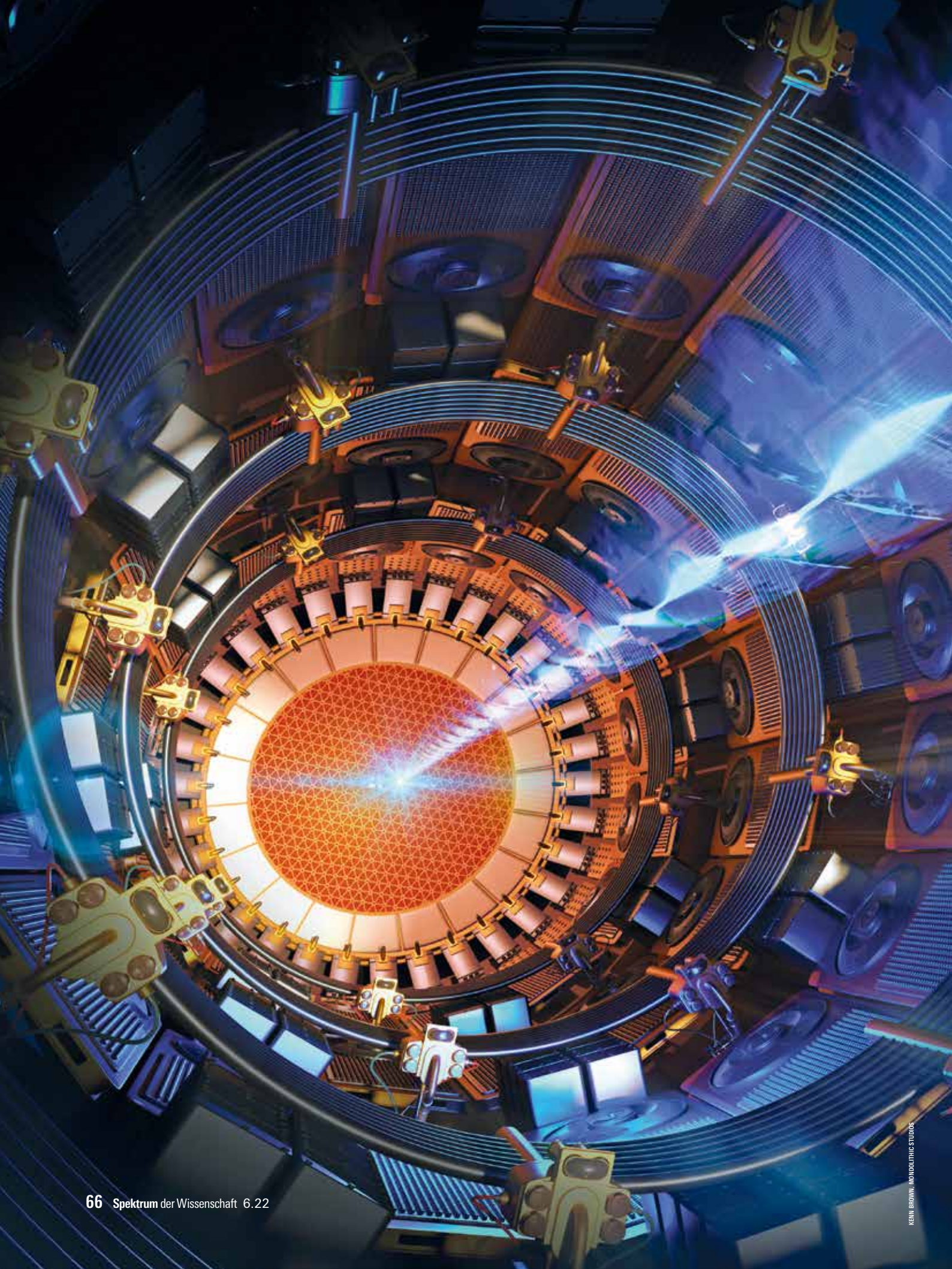
Die Geschwindigkeit der Strömung spielt eine Rolle dabei, wie auffallend die Thoreau-Reynolds-Welle ist. Sobald eine Geschwindigkeit von 23 Zentimeter pro Sekunde überschritten wird, können stromaufwärts vor der Linie »Kapillarwellen« entstehen, deren Verhalten vor allem von der Oberflächenspannung bestimmt wird. Die dadurch hervorgerufenen Kräuselungen machen indirekt auf die Linie aufmerksam, zumal der starre Film weiterhin nicht aus der Ruhe zu bringen ist.

Das neuere Forschungsinteresse an Thoreau-Reynolds-Wellen bezieht sich einerseits auf Meeresströmungen unter dem Einfluss unterschiedlicher überall vorkommender Substanzen. Andererseits hat das Phänomen längst Eingang in die labormäßige Untersuchung der Wirkung oberflächenaktiver Stoffe in einem viel allgemeineren Sinn gefunden.

#### LITERATURTIPP

**Berner, H.:** Der Thoreau-Reynolds-Grat und andere stehende Kapillarwellen. Books on Demand, 2021

*Das allgemein verständliche Buch bringt dem Leser das Phänomen mit zahlreichen ansprechenden Fotos näher.*



# ZEITMESSUNG STOPPUHR FÜR DIE QUANTENWELT

Ein Experiment soll die Zeit messen, die ein Teilchen für eine extrem kurze Strecke benötigt. Das Ergebnis könnte die gängige Sichtweise der Quantenmechanik erschüttern.

Anil Ananthaswamy ist Wissenschaftsjournalist und Autor mehrerer Bücher, eines davon handelt von der Bedeutung des Doppelspaltexperiments.

► [spektrum.de/artikel/2008774](https://www.spektrum.de/artikel/2008774)



**VERTRACKTE VERSUCHE**  
Apparaturen, mit denen sich die Bahnen kleinster Objekte messen lassen (hier eine Illustration), könnten dabei helfen, die beste mathematische Perspektive auf den Quantenkosmos zu identifizieren.

Ein scheinbar simples Experiment könnte ein neues Licht auf die Quantenmechanik werfen. Dabei geht es um die Messung der Zeit, die ein Teilchen benötigt, um von einem Ort zu einem anderen zu gelangen. Ein Team von der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) macht für derartige Versuche präzise Vorhersagen auf Basis der so genannten Bohmschen Mechanik. Bei dieser Theorie gibt es unsichtbare »Führungswellen«, die alle Objekte durch Raum und Zeit geleiten. Der US-Physiker David Bohm hat den Ansatz in den 1950er Jahren erdacht. Die übliche Quantentheorie hingegen liefert für das Experiment keine so genauen Aussagen, und man muss für die Berechnung der Laufzeiten der Teilchen auf Näherungen zurückgreifen. Dazu meint der Theoretiker Serj Aristarhov von der LMU: »Dass die Theorie in einem so einfachen Fall keine exakten Vorhersagen ermöglicht, sollte die Anhänger der Standard-Quantenmechanik zumindest stutzig machen.«

Im Prinzip ist der seltsame Charakter der Quantenwelt kein Geheimnis. Zur Verdeutlichung ihrer Absonderlichkeiten dient meist das klassische Doppelspaltexperiment, bei dem Elektronen auf einen Bildschirm geschossen werden (siehe »Versteckspiel in Raum und Zeit«). Dabei lässt sich nicht exakt vorhersagen, wo ein bestimmtes Elektron landen wird und beispielsweise einen Ort auf dem Detektor fluoreszieren lässt. Aber man kann die räumliche Verteilung berechnen, die mit der Zeit Gestalt annimmt, also das Muster aller nacheinander von den Elektronen hervorgerufenen Leuchtpunkte. An manchen Stellen werden mehr Elektronen landen, an anderen weniger.

Die verschiedenen Merkwürdigkeiten bei solch einem Versuch werden oft erörtert (siehe »Spektrum« Dezember 2018, S. 12). Dazu kommt ein noch seltsamerer und selten diskutierter Effekt: Unter sonst gleichen Bedingungen erreicht jedes Elektron den Detektor nach jeweils leicht unterschiedlichen Zeiten. Genau wie bei den Orten weisen auch die Augenblicke des Auftreffens eine Verteilung auf, und einige Ankunftszeiten kommen häufiger vor als andere. In der Standard-Quantenphysik gibt es keine Werkzeuge zur genauen Vorhersage dieser zeitlichen Verteilung. »Die normale Quantentheorie befasst sich nur mit dem Wo, nicht

mit dem Wann«, bekräftigt LMU-Theoretiker Siddhant Das. »Irgendetwas muss hier also faul sein.«

Hinter den Unzulänglichkeiten steckt ein tieferer Grund. Bei der üblichen quantenmechanischen Herangehensweise gibt es »Observablen«, das sind physikalische Eigenschaften, die gemessen werden können. Ein Beispiel ist die Position eines Teilchens. Jede solche Beobachtungsgröße ist mit einer mathematischen Vorschrift verbunden, die als Operator bezeichnet wird. Wie der österreichische Physiker und spätere Nobelpreisträger Wolfgang Pauli bereits 1933 zeigte, lässt sich die Zeit jedoch nicht in entsprechender Weise interpretieren. In seinem Buch »Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik« schrieb er: »Wir schließen also, daß auf die Einführung eines Operators  $t$  grundsätzlich verzichtet und die Zeit  $t$  in der Wellenmechanik notwendig als gewöhnliche Zahl betrachtet werden muß.«

Dessen ungeachtet ist die Messung der Ankunftszeit von Teilchen ein zentraler Bestandteil der experimentellen Physik. Von Massenspektrometern bis zu den Detektoren am Large Hadron Collider sind solche Daten unverzichtbar zum Berechnen der Massen und Impulse von Teilchen, Ionen und Molekülen. Obwohl es sich um Quantensysteme handelt, erfordern die Analysen Annahmen, die über die reine Quantenphysik hinausgehen. Beispielsweise soll sich das Teilchen, sobald es seine Quelle verlässt, klassisch verhalten, das heißt den newtonschen Bewegungsgesetzen gehorchen.

### **Genaue Berechnungen sind an Bedingungen für die Flugbahn geknüpft**

Das Ergebnis ist ein hybrider Ansatz, der teils quantenmechanisch und teils klassisch ist. Er beginnt mit der Quantenperspektive, bei der jedes Teilchen mathematisch abstrahiert durch eine so genannte Wellenfunktion dargestellt wird. Identisch präparierte Teilchen haben die gleichen Wellenfunktionen, wenn sie ihre Reise beginnen. Misst man jedoch den Impuls jedes Teilchens zum Zeitpunkt der Freisetzung, bekommt man jedes Mal andere Werte. Diese ergeben zusammengenommen eine Verteilung, die durch die anfängliche Wellenfunktion genau vorhergesagt ist. Unter der Annahme, dass ein Teilchen nach seiner Emission einer klassischen Flugbahn folgt, erhält man aus dem Ensemble von Werten für identisch präparierte Teilchen letztlich eine Verteilung der Ankunftszeiten am Detektor, die von der ursprünglichen Impulsverteilung abhängt.

Es gibt eine weitere häufig verwendete Methode, um Ankunftszeiten auf Grundlage der Standard-Quantenmechanik zu berechnen. Während ein Teilchen auf einen Detektor zufliegt, entwickelt sich seine Wellenfunktion gemäß der Schrödingergleichung, die den sich mit der Zeit ändernden Zustand beschreibt. Wenn sich etwa ein Detektor in einem gewissen horizontalen Abstand zu einer Quelle eines Teilchens befindet, bestimmt die Schrödingergleichung dessen Wellenfunktion und damit die Wahrscheinlichkeit, es an einer Stelle am Detektor zu messen. Das geschieht unter der (üblicherweise nicht belegbaren) Voraussetzung, dass das Teilchen einen Ort nur einmal durchquert. Anhand solcher Annahmen lässt sich die Wahrscheinlichkeit berechnen, der zufolge das Teilchen zu einem

## **AUF EINEN BLICK THEORIEN AUF DEM PRÜFSTAND**

- 1** In der Quantenphysik ist es nicht leicht zu ermitteln, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich ein Teilchen zu einem gewissen Zeitpunkt an einem Ort befindet. Dazu gibt es verschiedene mathematische Strategien.
- 2** Eine weniger populäre Deutung der Quantenmechanik liefert andere Zahlen als die üblichen Interpretationen – allerdings nur unter ganz bestimmten Umständen.
- 3** Ein Experiment könnte nun dabei helfen, die unterschiedlichen Vorhersagen zu überprüfen. Doch die praktische Umsetzung birgt einige Herausforderungen.

## Versteckspiel in Raum und Zeit

Beim Doppelspaltexperiment werden Teilchen durch zwei Schlitze in einer sonst undurchlässigen Wand geschossen. Hinter den Öffnungen treffen die Objekte auf einen Detektor, auf dem sie jeweils einen leuchtenden Punkt hinterlassen. Intuitiv würde man erwarten, dass sich eine Struktur ergibt, die der Form der Öffnungen entspricht. Doch tatsächlich erscheint nach und nach ein Interferenzmuster, wie man es sonst von Lichtwellen kennt: In Regionen konstruktiver Überlagerung kommt es zu hellen Streifen, bei gegenseitigem Auslöschen der Wellen bleibt es dunkel. Das passiert sogar dann, wenn man die Teilchen eines nach dem anderen durch den Doppelspalt schießt.

### Für die Orte lassen sich nur Wahrscheinlichkeiten angeben

Durch die Schlitze bewegt sich die Wellenfunktion des Teilchens, eine abstrakte mathematische Größe, die seinen Quantenzustand beschreibt. Wie bei einer Wasserwelle begegnen sich hinter dem Doppelspalt Berge und Täler, die sich wechselseitig verstärken und auslöschen. Am Ort des Detektors liefert die sich so ergebende Wellenform die Wahrscheinlichkeit dafür, das Teilchen anzutreffen.

Wellenfunktion

### Auch die Ankunftszeiten sind unbestimmt

Es ist nicht nur unmöglich, den Ort der Ankunft individuell exakt vorherzusagen, sondern ebenso den Zeitpunkt, zu dem das passiert. Zwar ist berechenbar, wie sich die Punkte vieler Teilchen entlang des Detektors verteilen, aber für die Zeiten funktioniert das nicht so einfach. Um zu ermitteln, wie sich die Auftreffzeiten verteilen, muss man zusätzliche Annahmen aufstellen, die sich je nach Interpretation der Quantenmechanik unterscheiden.

Zeit

NICK BOCKELMANN / SCIENTIFIC AMERICAN, JANUAR 2022

bestimmten Zeitpunkt  $t$  oder früher am Detektor ankommt. »Aus der Sicht der Standard-Quantenmechanik klingt das völlig vernünftig«, sagt Aristarhov, »und man kann sich davon eine schöne Antwort erwarten.«

Doch gibt es einen Haken. Um von der Wahrscheinlichkeit, dass die Ankunftszeit kleiner oder gleich  $t$  ist, zu jener zu gelangen, dass sie genau gleich  $t$  ist, muss eine Größe berechnet werden, die als Quantenfluss oder Wahrscheinlichkeitsstromdichte bezeichnet wird. Sie ist ein Maß dafür, wie sich mit der Zeit die Wahrscheinlichkeit ändert, das Teilchen am Ort des Detektors zu finden. Im Prinzip funktioniert das, allerdings kann der Quantenfluss zuweilen negativ sein. Das führt zu Wahrscheinlichkeiten, die kleiner als null sind – ein Ding der Unmöglichkeit. Zwar ist es schwer,

Wellenfunktionen zu konstruieren, bei denen das sehr ausgeprägt der Fall ist, aber grundsätzlich »verhindert nichts, dass die Größe negativ ist«, bekräftigt Aristarhov. »Und das ist eine Katastrophe.«

Die Schrödingergleichung lässt sich aber nur zur Berechnung der Verteilung der Ankunftszeiten heranziehen, sofern der Quantenfluss positiv ist. In der Realität kommt das lediglich dann mit Sicherheit vor, wenn sich der Detektor im Fernfeld befindet, das heißt in beträchtlicher Distanz zur Quelle, und sich das Teilchen frei bewegt. Für Messungen im Fernfeld liefern sowohl der hybride als auch der Quantenflussansatz ähnliche Vorhersagen, die gut mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmen. Beide Herangehensweisen gestatten jedoch keine eindeutigen Aus-

sagen für das Nahfeld, also für Versuchsaufbauten, bei denen sich der Detektor dicht hinter der Quelle befindet.

2018 begannen Das und Aristarhov zusammen mit ihrem damaligen Doktorvater an der LMU, dem 2021 verstorbenen Detlef Dürr, Vorhersagen von Ankunftszeiten aus der bohmischen Mechanik herzuleiten. Diese heißt auch De-Broglie-Bohm-Theorie, denn bereits in den 1920er Jahren hat der französische Physiker Louis de Broglie eine Herangehensweise erdacht, die zu der später unabhängig von Bohm entwickelten Mechanik äquivalent ist. Ihr zufolge wird jedes Teilchen durch eine Führungswelle gesteuert. Während bei der üblichen Interpretation der Quantenmechanik die Quantenobjekte vor einer Messung weder eine genaue Position noch einen Impuls und damit keine Flugbahn besitzen, sind die Teilchen in der bohmischen Mechanik real. Sie folgen komplizierten Bahnen, die durch präzise Bewegungsgleichungen beschrieben werden.

Eine der ersten Erkenntnisse der Forscher aus München war, dass Messungen im Fernfeld keinen Unterschied zwischen den Vorhersagen der bohmischen Mechanik und denen der anderen Ansätze ergeben. Die bohmischen Trajektorien werden bei großen Entfernungen zu geraden Linien, so dass die hybride semiklassische Näherung gilt. Was den Quantenfluss angeht, so ist dieser bei geraden Bahnen im Fernfeld immer positiv, und sein Wert wird von der bohmischen Mechanik genau vorhergesagt. Aristarhov resümiert: »Wenn man einen Detektor weit genug weg aufstellt und eine bohmische Analyse durchführt, erkennt man die Übereinstimmung mit dem Hybrid- und dem Quantenflussansatz.«

### Das Nahfeld ist noch unkartiertes Terrain

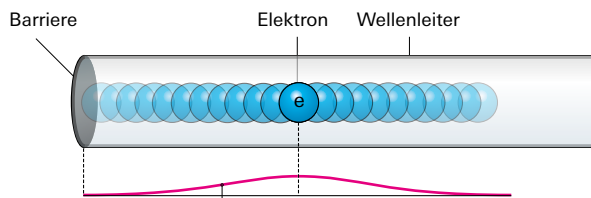
Der Schlüssel liegt also im Nahfeld. Messungen dort galten jedoch lange Zeit als unmöglich. »Der Nahfeldbereich ist überaus volatil und sehr empfindlich gegenüber der Form der Wellenfunktion, die man anfangs erzeugt hat«, erklärt Das. Hinzu kommt das Problem der kurzen Wege: »Wenn man sehr dicht an den Bereich heranrückt, an dem man zu Versuchsbeginn alles präpariert hat, wird das Teilchen praktisch sofort detektiert.« Dann wären, so Das, selbst mit den genauesten Apparaturen die Ankunftszeiten nicht mehr feststellbar und man könne entsprechend keine Unterschiede zwischen dieser und jener Vorhersage erkennen.

Um das Problem zu umgehen, erdachten Das und Dürr 2019 einen Versuchsaufbau, der es gestatten würde, Teilchen erst weit entfernt von der Quelle aufzuspüren und dennoch die Qualität der Vorhersagen der bohmischen Mechanik mit denen der üblichen quantenphysikalischen Methoden zu vergleichen. Der von den Physikern vorgeschlagene Aufbau ist konzeptionell einfach (siehe »Ankunftszeiten messen«). Er basiert auf einem Wellenleiter, einem zylinderförmigen Hohlraum, der die möglichen Bewegungen eines Teilchens beschränkt (so ist ein Glasfaserkabel ein Wellenleiter für Licht). An einem Ende des Wellenleiters präpariert man zum Beispiel ein Elektron in seinem niedrigsten Energiezustand. Ein elektrisches Potenzial hält es dort fest. Dieser Potenzialtopf besteht aus

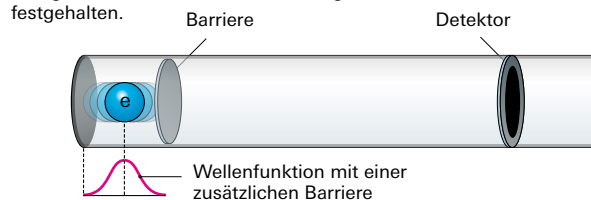
## Ankunftszeiten messen

Unterschiedliche Interpretationen der Quantenmechanik führen zu verschiedenen Vorhersagen für die Zeitpunkte, zu denen Teilchen auf den Detektor treffen. Präzise Tests könnten mit Hilfe eines 2019 vorgeschlagenen Experiments technisch möglich werden.

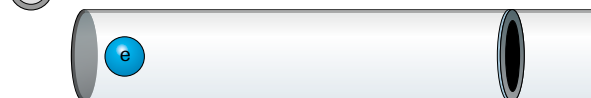
Auf Basis der Wellenfunktion eines Teilchens lässt sich die Wahrscheinlichkeit berechnen, es an einem bestimmten Ort anzutreffen.



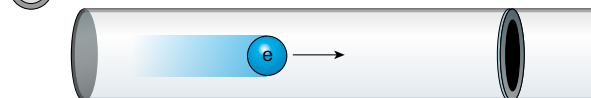
Bei dem Experiment wird ein Elektron in seinem niedrigsten Energiezustand von einem elektromagnetischen Potenzial festgehalten.



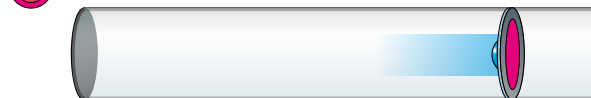
Die innere Barriere wird entfernt, die Zeitmessung beginnt



Das Elektron bewegt sich zum Detektor



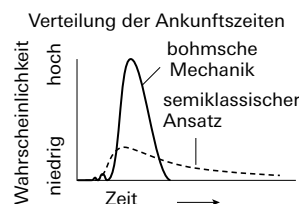
Die Zeitmessung endet mit dem Auftreffen auf den Detektor



Nach zahlreichen Wiederholungen des Versuchs ergibt sich eine Verteilung von Ankunftszeiten



Die Verteilung hängt davon ab, in welche Richtung der Spin in der Wellenfunktion des Teilchens zeigt. Bei senkrechter Orientierung gegenüber der Achse des Wellenleiters unterscheiden sich die Vorhersagen je nach Theorie drastisch.



zwei separaten Barrieren. Wird eine davon ausgeschaltet, kann das Teilchen aus seiner Gefangenschaft in den Wellenleiter entkommen.

Dabei wurde Das die mühsame Aufgabe zuteil, die genauen Parameter des Experiments festzulegen. Er führte dazu Berechnungen und Simulationen durch und bestimmte die theoretische Verteilung der Ankunftszeiten an einem Detektor, der weit entfernt von der Quelle entlang der Achse des Wellenleiters platziert ist. Schließlich erhielt er bei Teilchen wie Elektronen klare Ergebnisse für zwei verschiedene Arten von anfänglichen Wellenfunktionen. Hier fällt dem so genannten Spin eine zentrale Rolle zu. Diese quantenmechanische Größe ist mit der Wellenfunktion verbunden und hat eine räumliche Orientierung, die in jede beliebige Richtung zeigen kann. Zwei Fälle sind dabei besonders interessant: wenn der Spin entlang der Achse des Wellenleiters deutet und wenn er senkrecht dazu steht.

Ist der Spinvektor der Wellenfunktion parallel zum Wellenleiter ausgerichtet, erweist sich in der Simulation die mittels Quantenfluss ermittelte Verteilung der Ankunftszeiten als identisch mit der von der Bohrschen Mechanik vorhergesagten. Beide Datensätze unterscheiden sich jedoch erheblich von denen, die mit dem semiklassischen Ansatz berechnet wurden.

Noch krasser werden die Differenzen, wenn der Spinvektor senkrecht zum Wellenleiter steht. Mit Hilfe ihres LMU-Kollegen Markus Nöth konnten Das und Dürr nachweisen, dass alle Bohrschen Trajektorien den Detektor zu oder vor einem gewissen Zeitpunkt treffen. »So etwas hatten wir überhaupt nicht erwartet«, erinnert sich Das. Auch hier weicht die Bohrsche deutlich von der semiklassischen Theorie ab, die insbesondere zu keiner scharfen Grenze bei den Ankunftszeiten führt. Entscheidend ist aber, dass in dem Szenario der Quantenfluss negativ ist. Das macht die übliche Berechnung der Ankunftszeiten mit Hilfe der Schrödingergleichung unmöglich. Eine Situation, in der die Anhänger der Standard-Quantentheorie »kapitulieren würden«, so Das. Doch die Bohrsche Mechanik erlaubt weiterhin Vorhersagen.

### Prüfstand für unterschiedliche Sichtweisen auf die Quantenmechanik

Der Quantentheoretiker Charis Anastopoulos von der Universität Patras in Griechenland war nicht an der Arbeit beteiligt. Der Experte für Zeitberechnungen gibt sich zugleich beeindruckt und vorsichtig. »Der hier vorgeschlagene Versuchsaufbau scheint plausibel«, meint er. Jeder Ansatz zur Berechnung der Verteilung der Ankunftszeiten steht zugleich für eine andere Sichtweise auf die Quantenwelt. Deswegen, so Anastopoulos, könnte ein eindeutiges experimentelles Ergebnis die Grundlagen der Quantenmechanik berühren: »Das würde bestimmte Interpretationen rechtfertigen. Für die Bohrsche Mechanik, die eine sehr spezielle Perspektive einnimmt, hätte das natürlich große Auswirkungen.«

Zumindest ein Experimentator will den Vorschlag des Teams nun in die Tat umsetzen. Vor Dürrs Tod hatte Ferdinand Schmidt-Kaler von der Universität Mainz mit ihm Gespräche über die Messung von Ankunftszeiten geführt.

Der Mainzer Physiker ist Fachmann für spezielle Ionenfallen, bei der elektromagnetische Felder ein einzelnes Kalziumion festhalten. Dabei kühlt eine Anordnung von Lasern das Ion auf seinen quantenmechanischen Grundzustand ab, in dem die Unsicherheiten bezüglich seines Orts und Impulses am geringsten sind. Die Falle ist eine dreidimensionale Energiemulde und entsteht durch die Kombination zweier Potentiale. Schaltet man eines von ihnen aus, sind die Bedingungen ähnlich wie bei Das' und Dürrs hypothetischem Experiment: eine Barriere auf der einen Seite und ein abfallendes Potenzial auf der anderen. Das Ion rollt gewissermaßen diesen energetischen Abhang hinunter und gewinnt dabei an Geschwindigkeit. »Man kann außerhalb der Falle einen Detektor aufstellen und die Ankunftszeit messen«, sagt Schmidt-Kaler. »Das macht das Ganze so reizvoll.«

Sein Team hat bereits Experimente durchgeführt, bei denen Ionen aus der Falle geschleudert und detektiert wurden. So wies es nach, dass die Flugdauer von der anfänglichen Wellenfunktion des Teilchens abhängt. Die Arbeitsgruppe hat die Ergebnisse 2021 veröffentlicht. Außerdem liefen erste Tests, bei denen das Ion die Falle verlässt, von einer Art elektromagnetischem Spiegel zurückgeworfen und anschließend wieder eingefangen wird. Laut Schmidt-Kaler erreicht die Anlage dabei eine Effizienz von 98 Prozent. »Wir sind auf dem Weg«, gibt sich der Forscher zuversichtlich. »Das Experiment ist zwar nicht hinsichtlich so einer Messung von Zeitverteilungen optimiert, aber das wäre machbar.«

Allerdings ist das leichter gesagt als getan. Der Detektor außerhalb der Ionenfalle wird wahrscheinlich ein dünnes »Lichtblatt« aus Laserstrahlen sein, und das Team muss die Wechselwirkung des Ions mit dem Licht auf Nanosekunden genau bestimmen. Mit ähnlicher zeitlicher Präzision muss außerdem die eine Hälfte des Potentials abgeschaltet werden. Dazu kommen weitere Fallstricke auf dem Weg von der theoretischen Vorhersage zur praktischen Umsetzung.

Dennoch freut sich Schmidt-Kaler darauf, mit solchen Messungen den Grundlagen der Quantenmechanik zu Leibe zu rücken: »Daran ist besonders reizvoll, dass der Test sich von anderen völlig unterscheidet. Das ist wirklich etwas Neues.« Während Schmidt-Kaler die ersten Ergebnisse erwartet, gehen Aristarhov und Das auf weitere Arbeitsgruppen zu. »Experimentatoren auf der ganzen Welt sollen auf unsere Untersuchungen aufmerksam werden«, hofft Aristarhov. »Die Messungen werden wir dann mit gebündelten Kräften durchführen.« Die Beteiligten folgen damit dem Auftrag, den Dürr vor seinem Tod im Schlusssatz einer von ihm mitverfassten Veröffentlichung formuliert hat: »Inzwischen sollte offenkundig sein, dass das Kapitel über Zeitmessungen in der Quantenphysik nur geschrieben werden kann, wenn echte Daten dazu vorliegen.« ◀

### QUELLEN

**Das, S., Dürr, D.:** Arrival time distributions of spin-1/2 particles. *Scientific Reports* 9, 2019

**Stopp, F. et al.:** Single ion thermal wave packet analyzed via time-of-flight detection. *New Journal of Physics* 23, 2021

# KÜNSTLICHE INTELLIGENZ EIN CHIP NACH DEM VORBILD DES GEHIRNS

**Um die Fähigkeiten des menschlichen Gehirns nachzuahmen, optimieren Fachleute nicht nur Software, sondern auch Hardware. Nun haben Informatiker einen analogen Computerchip hergestellt, der ähnlich wie unser Denkorgan funktioniert – und extrem energieeffizient ist.**



**Allison Whitten** ist Neurowissenschaftlerin und Wissenschaftsjournalistin in Nashville.

» [spektrum.de/artikel/2008777](https://spektrum.de/artikel/2008777)

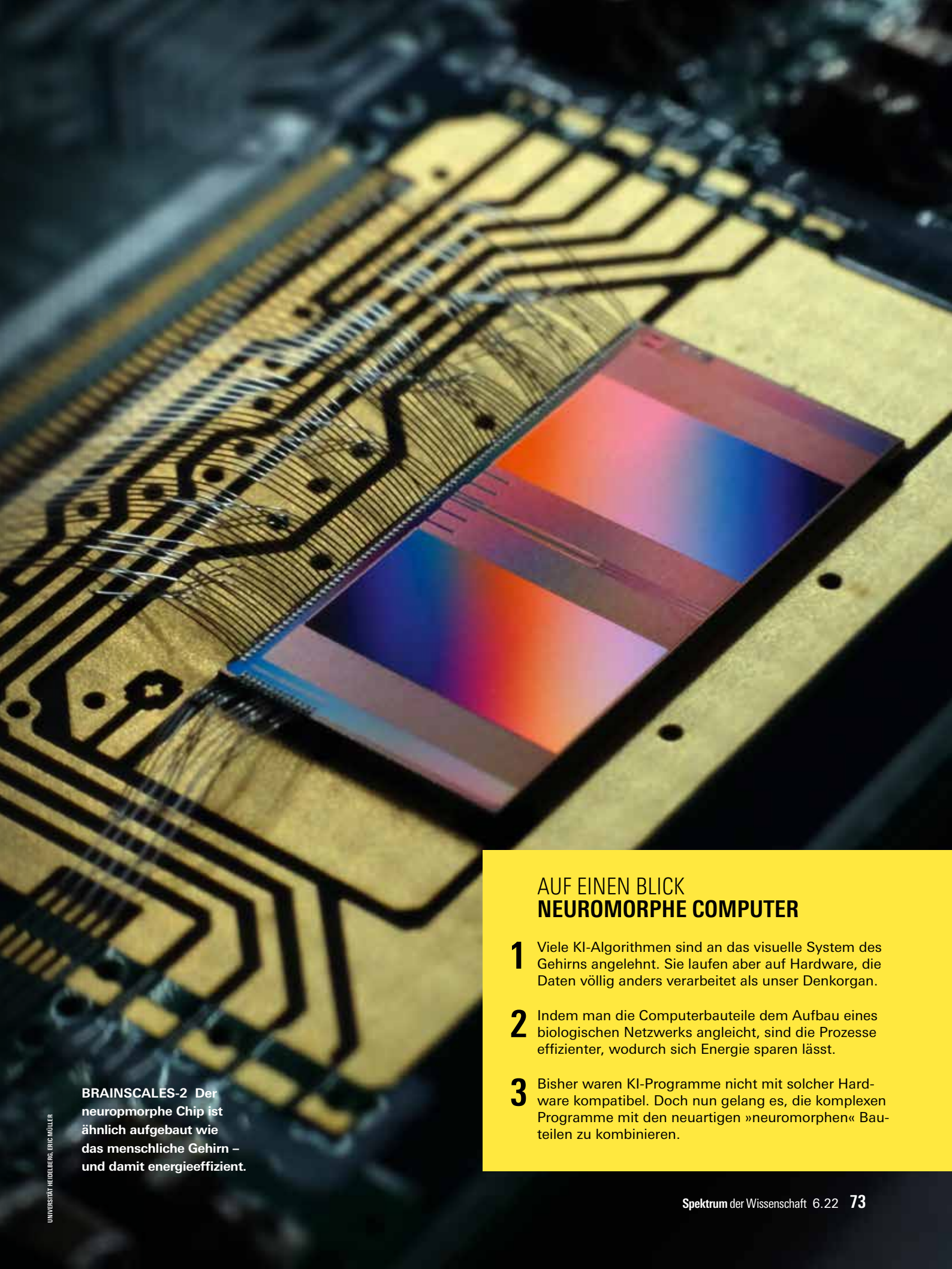
▶ Sobald es um die erstaunlichen Anwendungen moderner künstlicher Intelligenz geht – sei es im Bereich der Bilderkennung, Sprachverarbeitung, medizinischen Diagnostik oder Wettervorhersage –, sind meist neuronale Netze am Werk. Dabei handelt es sich um Algorithmen, deren Aufbau dem visuellen Kortex in Säugtieren nachempfunden ist. Die bemerkenswerten Fähigkeiten dieser Computerprogramme haben in den letzten Jahren oft für Schlagzeilen gesorgt, etwa als eine KI 2016 erstmals den Go-Weltmeister Lee Sedol besiegte oder 2020 die Faltung von Proteinen vorhersagen konnte. Doch die Programme stehen ihrem biologischen Vorbild in einem entscheidenden Punkt nach: Im Gegensatz zu unserem hocheffizienten Gehirn verschlingt ihre Ausführung auf Computern enorme Mengen an Strom. Aufwändige Modelle wie Übersetzungssoftware verbrauchen für ihr Training etwa fünfmal so viel Energie wie ein Auto über seine gesamte Lebensdauer.

Ein möglicher Ausweg könnte darin bestehen, das menschliche Gehirn nicht nur für die Software als Vorbild zu nehmen, sondern auch für die Hardware. Bei diesem als neuromorphes Engineering bekannten Ansatz versucht man Bauteile wie Computerchips herzustellen, die Signale ähnlich wie die Nervenzellen unseres Denkorgans verarbeiten. Anstatt also Daten wie in gewöhnlichen Rechnern über lange Wege zwischen einer zentralen Verarbeitungseinheit, dem Prozessor, und einem Speicher, der Festplatte, immer wieder hin- und herzutransportieren, sind die

beiden Komponenten wie in der gallertartigen Masse in unserem Schädel als neuromorphe Chips nebeneinander angeordnet: Aufeinander folgende Schichten aus Recheneinheiten, die »Neurone«, sind über Synapsen miteinander verbunden, wobei Letztere als Speicher fungieren. Elektrische Signale breiten sich somit von Schicht zu Schicht durch das System aus und werden währenddessen verarbeitet.

Damit folgt die Hardware der Funktionsweise künstlicher neuronaler Netze, der derzeit verbreitetsten KI-Algorithmen. Bei diesen sind die Recheneinheiten allerdings virtuell – das heißt, sie simulieren ein Neuron, laufen aber auf gewöhnlichen digitalen Bauteilen. Um Biologie und Technik weiter anzunähern, übertragen Forscherinnen und Forscher das Vorbild nun auf die Hardware von Computern. Besonders erfolgreich sind dabei große Unternehmen wie IBM mit Produkten wie dem TrueNorth-Chip oder Intel mit dem Loihi-Chip, die in den letzten Jahren einige Fortschritte in dem Bereich gemacht haben. Doch bei der Datenverarbeitung unterscheiden sich die Geräte immer noch erheblich von biologischen Systemen: Die Inhalte werden digital ausgewertet. Daher versuchen Fachleute, auch neuromorphe Chips zu entwickeln, die Informationen mit analogen Methoden verarbeiten. Dadurch können die Recheneinheiten wie ihre natürlichen Vorbilder mit kontinuierlichen Signalen umgehen und nicht bloß mit den digitalen Werten eins und null.





**BRAINSCALES-2** Der neuromorphe Chip ist ähnlich aufgebaut wie das menschliche Gehirn – und damit energieeffizient.

UNIVERSITÄT HEIDELBERG, ERIC MÜLLER

## AUF EINEN BLICK NEUROMORPHE COMPUTER

- 1** Viele KI-Algorithmen sind an das visuelle System des Gehirns angelehnt. Sie laufen aber auf Hardware, die Daten völlig anders verarbeitet als unser Denkkorgan.
- 2** Indem man die Computerbauteile dem Aufbau eines biologischen Netzwerks angleicht, sind die Prozesse effizienter, wodurch sich Energie sparen lässt.
- 3** Bisher waren KI-Programme nicht mit solcher Hardware kompatibel. Doch nun gelang es, die komplexen Programme mit den neuartigen »neuromorphen« Bauteilen zu kombinieren.

Die daraus entstehenden Geräte unterscheiden sich erheblich vom derzeitigen Aufbau und Rechenmodus gewöhnlicher Computer. Das soll eines Tages den Energieverbrauch von datenintensiven Rechenaufgaben wie dem Training moderner KI-Algorithmen drastisch senken.

Bisherige Chips sind allerdings noch nicht ausgereift genug, um die neuesten Trainingsverfahren auszuführen. Deshalb verlagert man diesen Prozess – selbst wenn es der energieintensivste ist – auf herkömmliche digitale Rechner und überträgt die fertigen Programme erst anschließend auf die analogen Geräte. Dadurch ließe sich wenigstens beim Ausführen der Aufgaben Strom sparen. Aber leider vertrauen sich bisher die KI-Algorithmen nicht mit den neuromorphen Chips. Denn durch den Herstellungsprozess sind die winzigen Bauteile nicht exakt aufeinander abgestimmt, die analogen Neurone sind beispielsweise nicht alle genau gleich groß. Daher bricht die Leistung der KI-Software ein, sobald sie auf analoge Hardware trifft.

Doch nun hat ein Forscherteam unter der Leitung von Friedemann Zenke vom Friedrich Miescher Institute for Biomedical Research in Basel und Johannes Schemmel von der Universität Heidelberg im Januar 2022 eine Arbeit veröffentlicht, die einen Weg aufzeigt, das Problem zu umgehen. Die Informatiker haben einen KI-Algorithmus entwickelt, der mit neuromorphen Chips zusammenarbeiten kann, indem das Programm lernt, wie sich die Nichtübereinstimmung der analogen Bauteile ausgleichen lässt. Die zu Grunde liegende Software ist ein gepulstes neuronales Netz (englisch: spiking neural network), das ein charakteristisches Kommunikationssignal der Nervenzellen im Gehirn modelliert: ein Aktionspotenzial. Damit stellt die Arbeit einen entscheidenden Schritt in Richtung analoges neuromorphes Computing mit KI dar. »Es ist erstaunlich, dass der Ansatz so gut funktioniert«, sagt Sander Bohte, ein Experte für gepulste neuronale Netzwerke am Centrum Wiskunde & Informatica (CWI), dem nationalen Forschungsinstitut für Mathematik und Informatik in den Niederlanden. »Die Arbeit wird wahrscheinlich als Vorbild für viele weitere analoge neuromorphe Systeme dienen.«

### Eine völlig neue Art, Information zu verarbeiten

So könnte es gelingen, neuronale Netze sowohl auf Software- als auch auf Hardwareseite umzusetzen und miteinander zu kombinieren. Die Vorteile eines solchen zweiseitigen Ansatzes scheinen enorm, weil man sich damit der Funktionsweise des menschlichen Gehirns deutlich annähert. Dieses emittiert elektrische Impulse (die Aktionspotenziale), die wie ein Blitz durch ein Neuron schießen. Herkömmliche digitale Rechner können den Prozess hingegen bloß binär darstellen: Bei jedem Durchlauf sendet ein Neuron entweder ein Aktionspotenzial aus oder nicht. Geräte, die sich die Biologie zum Vorbild nehmen, arbeiten mit Impulsen, die sich im Lauf der Zeit kontinuierlich ausbreiten, also auf analoge Weise. Wie in der Natur gibt es daher eine fließende Zeit und keine diskrete Taktfrequenz, welche die Dynamik des Systems bestimmt.

## Verschiedene Methoden im Vergleich

Der analoge BrainScaleS-2 (BSS-2) Chip schneidet ähnlich gut ab wie das gleiche gepulste neuronale Netz, das auf gewöhnlicher Software läuft. Herkömmliche künstliche neuronale Netze (kNN) sind um ein bis zwei Prozentpunkte präziser. Der digitale TrueNorth-Chip von IBM schneidet hingegen schlechter ab.

Umsetzung	Genauigkeit
BSS-2	97,3
Software	97,7
kNN	99,0
TrueNorth	92,7

QUELLE: FRAMER, B. ET AL.: SUBGRADIENT GRADIENTS FOR ANALOG NEUROMORPHIC COMPUTING. PNAS 119, 2022, TABLE 1-2

Auch die Ursache für ein Aktionspotenzial in den Bauteilen basiert auf einem stufenlosen Prozess. Wie in biologischen Netzwerken verändert sich innerhalb eines analogen Neurons die elektrische Spannung auf stetige Art und Weise im Lauf der Zeit. Wenn diese im Vergleich zur Spannung außerhalb der Zelle einen bestimmten Schwellenwert erreicht, sendet die Recheneinheit ein Aktionspotenzial aus. »Die Schönheit der Bearbeitungsprozesse des Gehirns liegt im Analogen. Eines der wichtigsten Ziele im neuromorphen Engineering ist, diesen Schlüsselaspekt erfolgreich nachzuahmen«, so Charlotte Frenkel, die hierzu an der Universität Zürich und der ETH Zürich forscht.

Seit 2011 entwickelt eine Arbeitsgruppe an der Universität Heidelberg unter der Leitung von Johannes Schemmel einen neuromorphen Chip, der das Gehirn für neurowissenschaftliche Experimente modellieren soll. Jetzt hat das Team die neueste Version des Geräts mit dem Namen BrainScaleS-2 vorgestellt. Dabei handelt es sich um einen einzelnen Chip, auf dem 512 analoge Neurone verbaut sind. Jedes davon ahmt die ein- und ausgehenden Ströme sowie die Spannungsänderungen einer Gehirnzelle nach. »Es ist ein dynamisches System, das ständig Informationen austauscht«, erklärt Schemmel. Und weil die Forscher die Materialien bei der Herstellung gezielt nach den am besten passenden elektrischen Eigenschaften ausgewählt haben, überträgt der Chip Daten sogar 1000-mal schneller als unser Gehirn.

Da die Merkmale der analogen Recheneinheiten jedoch leicht variieren – kein Produktionsprozess ist perfekt –, fallen die Spannungen und Stromstärken zwischen den Neuronen verschieden aus. Mit solchen Ungenauigkeiten können die Algorithmen üblicherweise nicht umgehen, da man sie zuvor auf Computern mit völlig identi-

schen virtuellen Neuronen trainiert. Das führt dazu, dass ihre Leistung auf den analogen Chips abfällt.

Die neue Arbeit präsentiert nun einen Ausweg für das Problem. Indem die Informatiker um Schemmel die Bauteile in den Trainingsprozess miteinbezogen, konnten sie den gepulsten neuronalen Netzen beibringen, die unterschiedlichen Spannungen auf dem BrainScaleS-2-Chip zu korrigieren. »Das ist einer der ersten überzeugenden Beweise dafür, dass sich Variabilität nicht nur kompensieren, sondern wahrscheinlich sogar nutzen lässt«, sagt Frenkel.

Um mit der Fehlanpassung der Geräte umzugehen, entwickelte Zenke 2019 zusammen mit seinen Kollegen Emre O. Neftci und Hesham Mostafa eine neue Trainingsmethode für die Algorithmen, das so genannte »surrogate gradient learning«. Letzteres ähnelt dem gewöhnlichen maschinellen Lernen, bei dem man versucht, eine so genannte Verlustfunktion zu minimieren. Man vergleicht dafür die Ausgabe des Algorithmus mit dem gewünschten Ergebnis und berechnet aus der Differenz beider Werte den Fehler, der möglichst klein sein soll. Dieser Schritt ist Teil des vorwärtsgerichteten Durchlaufs des Trainings: Die Eingangsdaten breiten sich von Schicht zu Schicht bis zur Ausgabe aus.

### **Die KI-Algorithmen auf der neuen Hardware schneiden ebenso gut ab wie gewöhnliche Programme**

Anschließend führt man einen rückwärtsgerichteten Durchgang aus. Das Programm passt die Parameter des Netzwerks (also die Verbindungsstärken zwischen den Neuronen unterschiedlicher Schichten) an, damit die Verlustfunktion kleiner wird. Dann wiederholt man den vorwärtsgerichteten Teil mit einer anderen Trainingsdatei. Das macht man so lange, bis der Algorithmus fast fehlerfreie Resultate liefert. So weit unterscheidet sich das »surrogate gradient learning« nicht von herkömmlichen Methoden. Doch bei gepulsten neuronalen Netzen ist das Vorgehen etwas komplizierter. Man startet mit einer einfachen Aufgabe, etwa dem Erkennen handgeschriebener Ziffern, die man auf dem analogen Chip laufen lässt (vorwärtsgerichteter Durchlauf). Dabei zeichnet man die Aktionspotenziale und die Spannungsverläufe innerhalb der Recheneinheiten auf. Der rückwärtsgerichtete Durchgang erfolgt hingegen auf einem gewöhnlichen Computer, da die Kapazität des neuromorphen Chips für diese Aufgabe nicht ausreicht. Dafür muss man die Spannungsverläufe zunächst glätten: Man erzeugt ein Modell mit gewünschten Resultaten (das Surrogat) und minimiert auf herkömmliche Weise den Fehler auf dem digitalen Rechner. Die veränderten Parameter werden dann auf den analogen Chip übertragen, indem man die Schaltungen entsprechend modifiziert. Anschließend wählt man neue Beispieldaten und wiederholt den Vorgang.

Da der vorwärtsgerichtete Durchlauf auf dem neuromorphen Gerät stattfindet, lernt der KI-Algorithmus automatisch, mit der Nichtübereinstimmung der Bauteile klarzukommen. Im Optimierungsprozess werden die Schwankungen von ganz allein mit berücksichtigt. Wenn das Training abgeschlossen ist, führt das gepulste neuronale Netz die Aufgabe auf dem Chip aus.

Wie die Forscher in ihrer aktuellen Arbeit berichten, erreicht das derart trainierte analoge Bauteil bei den getesteten Sprach- und Bilderkennungsaufgaben die gleiche Genauigkeit (nahe 99 Prozent) wie die besten gepulsten neuronalen Netze, die auf herkömmlichen digitalen Rechnern laufen. Das heißt, der Algorithmus hat erfolgreich gelernt, welche Änderungen er vornehmen muss, um die Fehlanpassungen der Hardware auszugleichen. »Dass es gelungen ist, dieses reale Problem zu lösen, ist eine großartige Leistung«, äußert der theoretische Neurowissenschaftler Thomas Nowotny von der University of Sussex.

Als die Forscher ihr System mit gewöhnlichen künstlichen neuronalen Netzwerken verglichen, die auf digitalen Computern laufen, unterschied sich die Trefferquote um maximal zwei Prozent. Dafür benötigt die Ausführung des Algorithmus auf den analogen Geräten etwa ein Tausendstel der Energie eines herkömmlichen Prozessors. Der Energieverbrauch sei zwar eine gute Nachricht, erklärt Frenkel, doch er gibt zu bedenken, dass auch digitale Hardware existiert, die speziell für ähnliche Aufgaben der Bild- und Spracherkennung optimiert wurde. Gegenüber solchen Bauteilen muss sich der analoge Chip noch bewähren – und nicht nur gegenüber Standardprozessoren. Wie Nowotny darüber hinaus erwähnt, lässt sich der Ansatz möglicherweise nur schwer auf große praktische Aufgaben übertragen, da man die Daten beim Trainingsprozess immer noch zwischen Rechner und Chip hin- und herschieben muss.

Langfristiges Ziel ist es, gepulste neuronale Netze von Anfang bis Ende auf neuromorphen Chips zu trainieren und auszuführen, ohne dass man einen weiteren herkömmlichen Computer benötigt. Das wird allerdings erst die Aufgabe einer neuen Chip-Generation sein. Eine solche Entwicklung braucht erfahrungsgemäß einige Jahre, so Nowotny.

Dennoch weist die Arbeit der Informatiker um Zenke und Schemmel bereits jetzt einen Weg in eine energieeffiziente Zukunft, bei der sich die Technologie immer mehr dem durch die Evolution optimierten Vorbild der Natur annähert. ◀

### QUELLEN

**McCallum, A. et al.:** Energy and policy considerations for deep learning in NLP. ArXiv 1906.02243, 2019

**Zenke, F. et al.:** Surrogate gradient learning in spiking neural networks. ArXiv 1901.09948, 2019

**Zenke, F. et al.:** Surrogate gradients for analog neuromorphic computing. PNAS 119, 2022

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »AI Overcomes Stumbling Block on Brain-Inspired Hardware« 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.



# KATEGORIEN THEORIE DIE MATHEMATIK DER MATHEMATIK

**Kommt man bei einem Problem nicht weiter, hilft es manchmal, Abstand zu nehmen und einen frischen Blick darauf zu werfen. So auch in der Mathematik: Die Vogelperspektive liefert neue Erkenntnisse, bringt aber Schwierigkeiten mit sich.**

WILL KIRK



**Emily Riehl** ist Mathematikerin an der Johns Hopkins University in Baltimore, Maryland.

► [spektrum.de/artikel/2008780](https://www.spektrum.de/artikel/2008780)

**DAS GROSSE GANZE** Ein Perspektivwechsel legt ungeahnte Zusammenhänge frei.

## AUF EINEN BLICK DEN ÜBERBLICK VERBESSERN

- 1** Einige Konzepte in der Algebra kann man auf die Geometrie übertragen. Solche Verbindungen gibt es in fast allen Bereichen der Mathematik; sie erleichtern die Arbeit ungemein.
- 2** Indem man die Zusammenhänge abstrahiert und Details ignoriert, lassen sich weitere Übereinstimmungen in den verschiedenen Gebieten finden.
- 3** Genau das macht die Kategorientheorie. Doch wie weit kann man abstrahieren, ohne das Verständnis zu sehr einzubüßen?

▶ An einem kühlen Herbsttag während meines Grundstudiums in Neuengland lief ich an einer U-Bahn-Station vorbei, als mir etwas ins Auge fiel. Da stand ein Mann neben einigen mathematischen Rätseln, die er an eine Wand gekritzelt hatte, und forderte die Passanten auf, sie zu lösen. Eines davon verlangte – mit nichts weiter als einem imaginären Lineal und Zirkel ausgestattet –, aus einem vorgegebenen Würfel einen mit doppelt so großem Volumen zu machen.

Das ließ mich innehalten, denn ich hatte diese Aufgabe schon einmal gesehen. Tatsächlich ist sie mehr als 2000 Jahre alt und wird Platon zugeschrieben. Mit Hilfe des Lineals kann man ein Liniensegment in jede beliebige Richtung verlängern, und der Zirkel ermöglicht es, einen Kreis von einem gewählten Mittelpunkt aus zu zeichnen. Der Knackpunkt des Rätsels: Alle gezeichneten Punkte und Geraden, die im Ergebnis auftauchen, müssen entweder schon im Ausgangswürfel enthalten sein oder sich daraus konstruieren lassen.

Wenn die Seitenlänge des zu verdoppelnden Würfels eins beträgt, muss

man die Seiten um den passenden Faktor verlängern. Dieser entspricht dem Wert  $2^{1/3}$ . Das klingt zunächst vielleicht nicht besonders kompliziert, aber die Länge darf nur mit Hilfe eines Lineals und eines Zirkels abgemessen werden. Und das gestaltet sich extrem schwierig. Mehr als 2000 Jahre lang gelang es niemandem, das Rätsel zu lösen. 1837 lieferte der Mathematiker Pierre Laurent Wantzel schließlich die Erklärung dafür, indem er bewies, dass das Problem nicht zu knacken ist.

Die Grundlagen für die Erkenntnis hatte sein französischer Zeitgenosse Évariste Galois (1811–1832) gelegt. Schon lange war bekannt, dass, ausgehend von einem Punkt als Ursprung und einer Strecke der Länge eins, sich mit Lineal und Zirkel alle rationalen Zahlen konstruieren lassen. Wantzel konnte zeigen, dass man mit beiden Werkzeugen auch weitergehen kann:

Tatsächlich lässt sich damit jede Lösung einer quadratischen Gleichung  $ax^2 + bx + c = 0$  erzeugen, wobei die Koeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$  bereits konstruierten Punkten entsprechen müssen. Doch die Länge  $2^{1/2}$  ist ein Ergebnis der kubischen Gleichung  $x^3 - 2 = 0$ . Wie Galois bewies, kann man eine solche Gleichung niemals durch eine quadratische Formel lösen. Damit zeigte Wantzel, dass es unmöglich ist, das Volumen eines Würfels lediglich mit einem Lineal und einem Zirkel zu verdoppeln.

Da mir all das bewusst war, sprach ich den Mann auf der Straße darauf an. Ich versuchte, ihm zu erklären, warum sein Rätsel nicht lösbar war, doch das führte zu nichts. Er entgegnete bloß, ich sei durch meine Ausbildung engstirnig und unfähig, »über den Tellerrand zu blicken«.

Auch wenn diese Begegnung frustrierend war, führte sie mich zu einer interessanten Frage: Wie konnte ich – eine unbedarfte Studentin im dritten Studienjahr – in nur

wenigen Wochen lernen, mit abstrakten mathematischen Erkenntnissen wie denen von Galois umzugehen? Bereits im Grundstudium lernt man heutzutage Stoff, der selbst Genies wie Isaac Newton, Gottfried Leibniz, Leonhard Euler und Carl Friedrich Gauß in Erstaunen versetzt hätte.

Die Antwort darauf mag überraschen: Den Fortschritt ermöglicht größere Abstraktion. Indem man die Details eines Bereichs ignoriert und eine Art Vogelperspektive einnimmt, ergeben sich Zusammenhänge, die vorher nicht ersichtlich waren. Die nötigen Instrumente für einen solchen Rundumblick liefert die Kategorientheorie. Sie befasst sich damit, welche Objekte sich ähneln, um sie in Kategorien zu gruppieren. Dadurch lassen sich ihre relevanten Eigenschaften besser untersuchen.

Eines der Kernprinzipien der Theorie (das so genannte Lemma von Yoneda) besagt, dass sich jedes mathematische Konstrukt vollständig durch seine Beziehungen zu ähnlichen Dingen bestimmen lässt. Somit kann man allgemeine Regeln formulieren, die für alle Kategorien gelten, anstatt für jeden einzelnen mathematischen Bereich aufwändig verschiedene Gesetzmäßigkeiten aufzuschlüsseln, wodurch man schnell den Überblick verliert.

In den letzten Jahrzehnten hat die Kategorientheorie die Auffassung von Gleichheit gewandelt. Fachleute haben die Prinzipien der Disziplin immer weiter verallgemeinert und schließlich so genannte Unendlich-Kategorien ( $\infty$ -Kategorien) eingeführt, welche die Theorie auf unendliche Dimensionen erweitern. Damit lassen sich Probleme untersuchen, bei denen die Beziehungen zwischen Objekten zu subtil sind, um sie durch gewöhnliche Kategorien zu erfassen. Indem man kontinuierlich aus einem System herauszoomt, kann man über bereits bekannte Prinzipien nachdenken und neue Konzepte finden. Doch für dieses hohe Maß an Abstraktion muss man einen Preis zahlen: Es wird immer unklarer, wann zwei Objekte übereinstimmen.

### Ein Zoo aus mathematischen Objekten

Wie viele meiner Kolleginnen und Kollegen wurde ich wegen meines schlechten Gedächtnisses auf die Kategorientheorie aufmerksam. Denn spätestens im Studium begegnet man einem regelrechten Zoo mathematischer Objekte, die in den letzten Jahrhunderten entstanden sind. Allein in der Algebra, die sich mit den Lösungen von Gleichungen beschäftigt, unterscheidet man zwischen Gruppen (die aus einem Zahlensystem wie den ganzen Zahlen und einer Verknüpfung wie der Addition bestehen), Ringen (Zahlensystem und zwei Verknüpfungen) und Körpern (Ringe mit bestimmten Eigenschaften).

Und die Algebra ist nur eines von vielen Fächern an der Universität. Weitere Eckpfeiler sind die Topologie – das abstrakte Studium des Raums – und die Analysis, die Funktionen, Wahrscheinlichkeitsräume sowie komplexe Mannigfaltigkeiten behandelt. Wie soll man da den Überblick behalten?

Eine seltsam anmutende Idee der Mathematik ist es, Dinge durch Abstraktion zu vereinfachen. Wie die Kategorientheoretikerin Eugenia Cheng in ihrem 2018 erschienenen Buch »The Art of Logic in an Illogical World« schreibt, »besteht ein mächtiger Vorteil darin, dass viele verschiede-

## Glossar

**Kategorie:** eine Sammlung von Objekten und zusammensetzbaren Transformationen (so genannte Morphismen) zwischen ihnen

**Komposition:** eine Transformation mehrmals hintereinander ausführen

**Identität:** die Abbildung eines Objekts auf sich selbst, ohne es zu verändern

**Symmetrie:** eine invertierbare Transformation (etwa eine Drehung oder Spiegelung) eines Objekts auf sich selbst

**Isomorphismus:** eine Art »Gleichheit«, die zwischen zwei Objekten in einer Kategorie bestehen kann

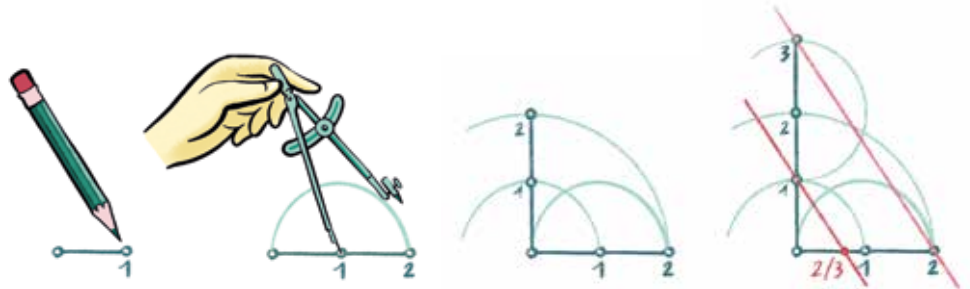
**Fundamentalgruppe:** eine Kategorie, deren Objekte die Punkte in einem Raum sind und deren Morphismen Pfade zwischen ihnen darstellen

**Homotopie:** eine stetige Verformung eines Pfades in einen anderen

**$\infty$ -Kategorie:** ein unendlich-dimensionales Analogon einer Kategorie, das höherdimensionale Morphismen enthält, mit einer abgeschwächten Kompositionsregel

**$\infty$ -Fundamentalgruppoid:** eine Unendlich-Kategorie mit Punkten, Pfaden, Homotopien und höheren Homotopien in einem Raum

**RATIONALE ZAHLEN KONSTRUIEREN** Bloß mit einem Lineal und einem Zirkel ausgestattet kann man alle rationalen Zahlen auf dem Zahlenstrahl treffen. Für beliebige reelle Zahlen geht das allerdings nicht.



MATTEO PARNIELLA / SCIENTIFIC AMERICAN, OKTOBER 2021

ne Situationen gleich erscheinen, wenn man einige Details vergisst«. Dieser Gedanke führte bereits zur modernen Algebra, die Anfang des 20. Jahrhunderts entstand. Damals vereinheitlichte man die Lösungen von Polynomgleichungen und Konfigurationen von Figuren. Dafür formulierten Fachleute Axiome, welche die Gemeinsamkeiten der unterschiedlichen Strukturen erfassen.

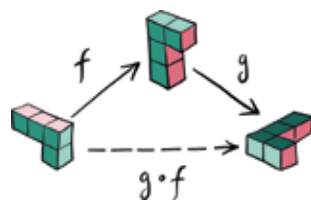
Daraus entwickelten sich die genannten Konzepte von Gruppen, Ringen und Körpern, die es ermöglichen, ein mathematisches Objekt allein anhand seiner relevanten Eigenschaften zu beschreiben und zu erforschen – selbst wenn man es nicht konkret konstruieren kann. So lassen sich Aussagen über geometrische Körper treffen, von denen niemand weiß, wie sie aussehen oder wie man sie erzeugt.

Doch trotz der groben Gruppierung ist die mathematische Welt noch immer zu groß, als dass ein einzelner Mensch sie vollständig begreifen kann. Allein innerhalb der Algebra gibt es zu viele Zusammenhänge, die man unmöglich alle im Detail verstehen kann. Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelten Mathematiker daher die universelle Algebra. Anstatt Strukturen mit festen Verknüpfungen und Eigenschaften zu studieren, befasste man sich nun mit allgemeinen Objekten, die beliebige Merkmale besitzen. Indem man diese nach der Untersuchung festlegt, gelangt man zurück zu den üblichen Gebilden wie Gruppen, Ringen und Körpern.

Zwar stellt die universelle Algebra einen bedeutenden Schritt zur Verallgemeinerung dar, sie lässt aber andere mathematische Gebiete außer Acht. Man erfährt damit nichts über die Analysis, Zahlentheorie oder Topologie. Daher führten Fachleute eine weitere Abstraktionsebene ein, auf der sich erstaunlich viele Theoreme gleichzeitig beweisen lassen – ohne genau anzugeben zu müssen, von welcher Art von Objekten diese handeln.

Den Schritt ermöglicht die Kategorientheorie, die Samuel Eilenberg und Saunders Mac Lane in den 1940er Jahren entwickelt haben. Dabei hatten die zwei Mathematiker ursprünglich anderes im Sinn: Sie wollten den damals schwammigen Begriff »natürliche Äquivalenz« definieren.

**KOMPOSITION** Transformationen  $f$  und  $g$  lassen sich stets hintereinander ausführen – das erzeugt einen neuen Morphismus, der auch Teil der Kategorie ist.



MATTEO PARNIELLA / SCIENTIFIC AMERICAN, OKTOBER 2021

Doch tatsächlich bietet das daraus entstandene Fachgebiet eine Möglichkeit, allgemeine Aussagen über die universelle Algebra und andere Gebiete der Mathematik zu treffen.

Wie Eilenberg und Mac Lane zeigten, lässt sich jede Art von Objekt – von geometrischen Räumen über Gruppen bis hin zu Mengen – einer Kategorie zuordnen. Diese besteht aus den Strukturen selbst, die man sich als Punkte vorstellen kann, und einer Reihe von Transformationen, so genannten Morphismen, die sich durch Pfeile zwischen den Punkten darstellen lassen.

Ein Beispiel für eine Kategorie findet sich in der linearen Algebra, die sich Vektorräumen wie dem gewöhnlichen dreidimensionalen Raum widmet. Die entsprechenden Morphismen sind in diesem Fall Matrizen, die Vektoren in andere überführen. Eine entscheidende Eigenschaft von Morphismen ist, dass sie sich hintereinander ausführen lassen und damit einen neuen Morphismus bilden. Man kann etwa einen Vektor drehen und anschließend spiegeln, indem man ihn nacheinander mit zwei Matrizen multipliziert. Es ist aber auch möglich, beide Transformationen gleichzeitig durch eine einzige Matrix umzusetzen. Das ist in allen Kategorien so: Zwei Morphismen ergänzen sich zu einem dritten.

Das ist im Prinzip die alleinige Anforderung an eine Kategorie. Damit stellt sich die Frage, inwiefern sich das abstrakte Konzept überhaupt als nützlich erweisen kann. Zwar besitzen die Objekte innerhalb der Kategorien unterschiedliche Eigenschaften, doch zwischen ihnen kann man wiederkehrende Muster erkennen, die sich stark ähneln.

### Gleichungen als geometrische Graphen

Ein Beispiel dafür ist die Verbindung zwischen der Geometrie und der Algebra. Auf der algebraischen Seite gibt es bestimmte polynomiale Gleichungen wie  $x^2 + 3yz^3 + 5 = 0$  und auf der geometrischen die dazugehörigen Kurven, die man in ein Koordinatensystem zeichnet. Die Kategorien zu den entsprechenden Objekten (also Gleichungen und Kurven) ähneln sich stark.

Das erkannte der Gelehrte René Descartes bereits im 17. Jahrhundert. Er fand heraus, dass sich Polynome sowohl entweder rechnerisch (also im Sinne der Algebra) oder zeichnerisch (indem man sie in ein kartesisches Koordinatensystem überträgt) untersuchen lassen. Algebra und Geometrie sind demnach tief miteinander verbunden, was sich in ihren Kategorien niederschlägt.

Gleiches ergibt sich für bestimmte Strukturen innerhalb eines Gebiets. Auch zwischen Gruppen, Ringen und Vektorräumen gibt es Parallelen, wie man an ihren Kategorien

erkennen kann. Zudem weisen Kategorien aus der Topologie oder Analysis weitere Ähnlichkeiten auf. Dadurch ist es möglich, gebietsübergreifend zu lernen. Solche Muster ermöglichen es, teilweise überraschende Analogien zwischen zuvor unverbundenen Bereichen zu entdecken.

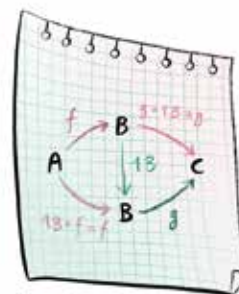
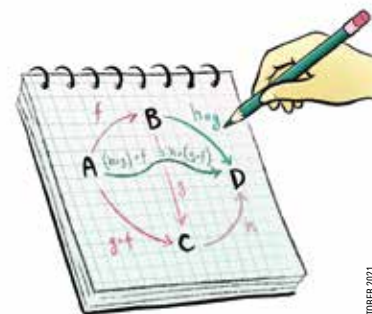
Insgesamt ergeben sich also verschiedene Abstraktionsebenen: Ganz grundlegend sind konkrete Objekte wie eine bestimmte Oberfläche oder eine Gleichung, die zu Strukturen wie Gruppen und Körpern zusammengefasst werden. Diese lassen sich wiederum zu dem Konzept einer Kategorie zusammenfügen. Das hohe Maß an Abstraktion kommt mit neuen Herausforderungen einher: Auf der Ebene ist nicht mehr klar, wann zwei Dinge »gleich« sind. Das Problem lässt sich durch Gruppen veranschaulichen.

Man kann sich eine Gruppe als abstrakte Sammlung von Symmetrien vorstellen. Die Elemente entsprechen dann Transformationen, die ein bestimmtes Objekt spiegeln oder drehen, bevor sie es in die ursprüngliche Position zurückbefördern. Zum Beispiel kann man eine Gruppe zu der Form eines T-Shirts definieren. Die einfachste Transformation ist jene, die nichts tut: Der Träger lässt sein Oberteil unverändert. Eine andere entspricht einer Bewegung, bei der die Person die Arme aus den Löchern nimmt und das Shirt um 180 Grad um ihren Hals dreht. Damit zeigt die Rückseite nun nach vorne. Die dritte Transformation besteht darin, das Kleidungsstück auszuziehen und auf links zu drehen. Zudem kann man den zweiten und den dritten Schritt verbinden: Das Shirt erst auf links drehen und dann rotieren. Jede dieser vier Handlungen zählt als Symmetrie, weil die Form des Oberteils dadurch unverändert bleibt.

Nun kann man diese Gruppe, die aus vier Elementen besteht, mit einer weiteren vergleichen. Jene gehört zu Matratzen, also einer ganz anderen geometrischen Figur. Neben der Identität, bei der man sie in ihrer ursprünglichen Position belässt, kann man sie entweder in der Ebene drehen (so dass das Fußteil danach das Kopfteil ist) oder wenden (damit die zur Boden gewandte Seite nach oben zeigt). Zudem kann man beide Drehungen nacheinander ausführen.

Obwohl sich ein T-Shirt stark von einer Matratze unterscheidet, haben deren dazugehörige Symmetriegruppen die gleiche Form: Sie bestehen aus jeweils vier Transfor-

**KOMPOSITIONS-REGELN** Die Komposition folgt den gewohnten Gesetzen: Sie ist sowohl assoziativ (oben) als auch unitär (unten).



mationen und – was entscheidend ist – jeder Zug in der Gruppe des Kleidungsstücks lässt sich mit einem in der Matratzengruppe so kombinieren, dass die Hintereinanderausführungen der entsprechenden

Bewegungen ebenfalls zusammenpassen. Die jeweiligen Elemente lassen sich also aufeinander abbilden. In der Fachsprache sind diese Gruppen durch einen Isomorphismus miteinander verbunden beziehungsweise »isomorph«.

Solche Übereinstimmungen finden sich in jeder Kategorie: Ein Isomorphismus zwischen zwei Objekten  $A$  und  $B$  ist durch ein Paar von Transformationen  $f: A \rightarrow B$  und  $g: B \rightarrow A$  gegeben, falls ihre Hintereinanderausführungen  $g \circ f$  und  $f \circ g$  den jeweiligen Identitäten  $1_A$  und  $1_B$  entsprechen. Das heißt, wenn man auf ein Element  $a$  aus  $A$  zuerst  $f$  und dann  $g$  anwendet, erhält man wieder  $a$ :  $g(f(a)) = a$ .

### Was bedeutet Gleichheit?

In der Kategorie der topologischen Räume sind Isomorphismen inverse Paare stetiger Funktionen. Was heißt das? Zum Beispiel gibt es eine Umformung, die einen ungebackenen Donut in einen Kaffeebecher verwandelt: Das Loch des Kringels wird zum Henkel, und der Becher entsteht durch eine Vertiefung, die man mit dem Daumen eindrückt. Weil die Verformung stetig ist, reißt der Teig dabei nicht ein. Die inverse Funktion garantiert, dass man die Tasse wieder problemlos in das Gebäck umwandeln kann. Aus diesem Grund scherzen Mathematiker, Topologen könnten einen Kaffeebecher nicht von einem Donut unterscheiden, denn als abstrakte Räume seien sie gleichwertig.

In den letzten Jahren hat sich immer stärker die Ansicht durchgesetzt, dass man isomorphe Dinge als identisch behandeln kann, ohne die dazugehörigen Zusammenhänge grundlegend zu verändern. Jede Aussage über eine Tasse treffe in gleichem Maß auf einen Donut zu. Doch das hat auch zu Schwierigkeiten geführt: So ist man sich nach mehreren Jahren nicht sicher, ob der Beweis der abc-Vermutung von Shinichi Mochizuki richtig ist, in dem er zwei Dinge als gleich ansieht, die andere Mathematiker als unterschiedlich ansehen (siehe »Spektrum« Dezember 2019, S. 80).

Das hat Kategorientheoretiker dazu veranlasst, in ihrem Sprachgebrauch den bestimmten Artikel durch einen unbestimmten zu ersetzen: Sprechen sie von »diesem«, meinen

## Komposition von Morphismen

In einer Kategorie existiert für jedes Paar von Morphismen  $f: A \rightarrow B$  und  $g: B \rightarrow C$  ein eindeutiger zusammengesetzter Morphismus  $g \circ f: A \rightarrow C$ . Die Verknüpfung von Morphismen ist assoziativ, das heißt  $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$ ; zudem gibt es für jedes Objekt  $B$  einer Kategorie ein neutrales Element  $1_B$ , also eine Transformation, die alle anderen Morphismen  $g$  und  $f$  bezüglich  $B$  unverändert lässt:  $g \circ 1_B = g$  und  $1_B \circ f = f$ .



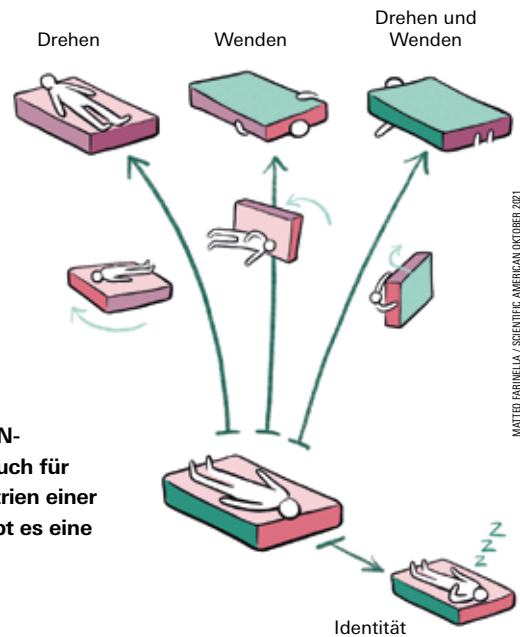
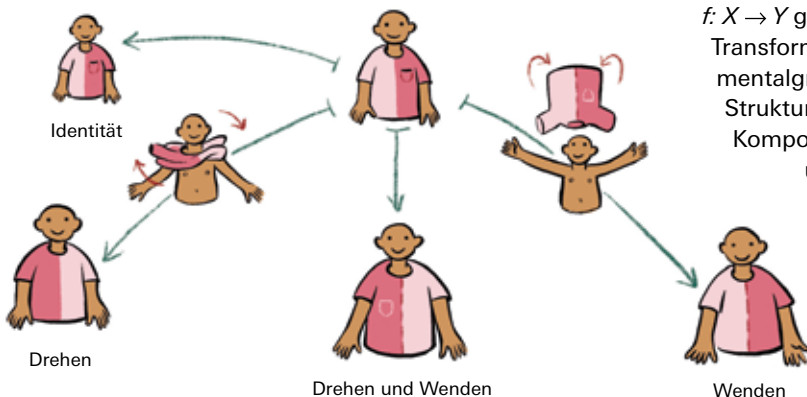
sie eigentlich »ein« Objekt mit solchen Eigenschaften. Das passiert etwa, wenn man »die« disjunkte Vereinigung zweier Mengen  $A$  und  $B$  betrachtet. Wie die gewöhnliche Vereinigung enthält die disjunkte Version  $A \sqcup B$  eine Kopie jedes Elements von  $A$  und  $B$ . Doch zusätzlich besitzen die Elemente in  $A \sqcup B$  eine Art Gedächtnis, das besagt, aus welcher Menge sie ursprünglich stammen.

Tatsächlich gibt es viele verschiedene Möglichkeiten, um eine solche Vereinigung zu konstruieren. Beispielsweise kann man die Elemente mit einem Index versehen, der auf die jeweilige Herkunft hindeutet. Je nachdem, wie man den Index konstruiert, unterscheiden sich die Ergebnisse  $A \sqcup B$  voneinander – aber sie sind alle isomorph. Anstatt Zeit damit zu verschwenden, darüber zu streiten, welche Konstruktion die sinnvollste ist, ignoriert man üblicherweise diese Mehrdeutigkeit und spricht von »der« disjunkten Vereinigung. Ebenso bezeichnen Fachleute sowohl die T-Shirt- als auch die Matratzengruppe als »die kleinsche Vierergruppe«.

Die breit gefächerte Äquivalenz gilt heute als der Grundgedanke der Kategorientheorie. Das spiegelt sich unter anderem im Fundamentalsatz, dem wichtigsten Theorem des Bereichs, wider. Dieses entstand, als der damals junge Mathematiker Nobuo Yoneda 1954 am Pariser Bahnhof Gare du Nord Mac Lane einen so genannten Hilfssatz (Lemma) beschrieb. Lemmata benutzt man eigentlich, um eine bedeutendere Tatsache zu beweisen – wie eine Art Zwischenschritt auf dem Weg zum Ergebnis. Aus Yonedas Lemma folgt, dass jedes Objekt vollständig durch seine Beziehung zu den anderen Inhalten einer Kategorie bestimmt ist.

Das klingt zunächst nach einer recht abstrakten Idee, aber tatsächlich findet sie sich auch in den Naturwissenschaften. In einem Teilchenbeschleuniger misst man beispielsweise nicht die Partikel direkt, sondern weist ihre Präsenz durch die Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung nach. Ebenso lässt sich ein topologischer Raum  $X$  charakterisieren, indem man ihn mit stetigen Funktionen  $f: T \rightarrow X$

**T-SHIRT-GRUPPE** Die Symmetrien eines T-Shirts ermöglichen es, eine Gruppe aus den Transformationen zu bilden, die das Kleidungsstück unverändert lassen. Dazu gehören Rotationen und Spiegelungen.



**MATRATZEN-GRUPPE** Auch für die Symmetrien einer Matratze gibt es eine Gruppe.

untersucht, die ihn zu anderen Räumen  $T$  in Beziehung setzen.

Zum Beispiel erhält man die Punkte von  $X$ , wenn die verschiedenen  $T$  aus einzelnen Punkten bestehen. Möchte man hingegen erfahren, ob  $X$  zusammenhängend ist, nutzt man Abbildungen  $p: I \rightarrow X$  mit einem Intervall  $I = [0,1]$  als Definitionsbereich. Die  $p$  definieren einen eindimensionalen Pfad auf  $X$  vom Punkt  $p(0)$  zu  $p(1)$ . Diesen kann man sich als den zurückgelegten Weg einer Ameise vorstellen, die auf  $X$  entlangwandert. Wenn das Insekt jeden Ort auf  $X$  erreichen kann, ohne zu hüpfen, ist der Raum zusammenhängend.

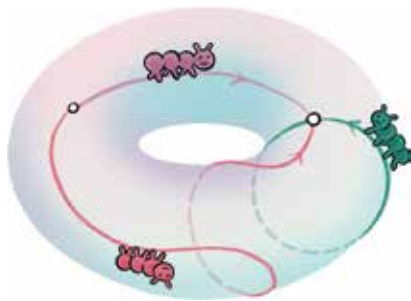
**Objekte durch Punkte und Pfade untersuchen**

Die Punkte und Pfade lassen sich außerdem dazu verwenden, topologische Probleme in die Algebra zu verfrachten. Zu jedem Raum  $X$  kann man eine Kategorie  $\pi_1(X)$  konstruieren, die so genannte Fundamentalgruppe von  $X$ , deren Objekte den Punkten auf  $X$  entsprechen und deren Morphismen durch die darauf befindlichen Pfade gegeben sind. Lässt sich ein Pfad in einen anderen mit gleichen Endpunkten verformen, gehören sie zum selben Morphismus, sie sind »homotop« zueinander.

Fundamentalgruppen haben die angenehme Eigenschaft, dass sie die gleichen Merkmale wie die dazugehörigen Räume haben: Wenn es eine stetige Funktion  $f: X \rightarrow Y$  gibt, dann existiert auch eine entsprechende Transformation  $\pi_1 f: \pi_1(X) \rightarrow \pi_1(Y)$  zwischen den Fundamentalgruppen. Zudem behält die Zuordnung die Struktur der ursprünglichen Abbildungen bezüglich Kompositionen und Identitäten bei:  $\pi_1(g \circ f) = \pi_1 g \circ \pi_1 f$  und  $\pi_1(1_X) = 1_{\pi_1(X)}$ . Somit scheint  $\pi_1$  die wesentlichen Informationen über topologische Räume zu enthalten.

Doch genügt die Fundamentalgruppe, um  $X$  vollständig zu charakterisieren? Tatsächlich ist das der Heilige Gral der Topologie: Seit Jahrhunderten suchen Fachleute nach einer mathematischen

**GESCHLOSSENE KURVEN** Durch die möglichen Rundwege einer Ameise erfährt man einiges über die zu Grunde liegende Figur.

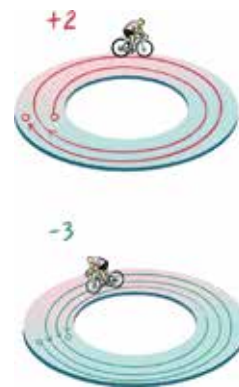


MATTED FARNELLA / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2021

den Kreis zu verlassen oder das Gummi durchzuschneiden. Daher enthält die Fundamentalgruppe alle ganzen Zahlen, wobei das Vorzeichen angibt, in welche Richtung der Pfad verläuft.

Im Gegensatz dazu fällt die Fundamentalgruppe der Kreisscheibe viel langweiliger aus. Jeder Weg, den man darauf einzeichnet, lässt sich zu einem Punkt zusammenziehen. Somit besteht die entsprechende Gruppe aus bloß einem Element – und nicht aus unendlich vielen wie beim Kreis. Gleiches ergibt sich für eine Kugeloberfläche, auf der sich ebenfalls alle Wege zusammenziehen lassen.

Doch die Fundamentalgruppe hat einen großen Nachteil: Mit Punkten und Pfaden allein kann man nicht die Struktur eines hochdimensionalen Raums erkennen. Um tiefere Einblicke in komplexere  $X$  zu erhalten, muss man zusätzlich stetige Funktionen  $f$  von der zweidimensionalen Kreisscheibe  $D$  auf  $X$  betrachten, also  $f: D \rightarrow X$ . Diese heißen Homotopien. Darüber hinaus lassen sich höhere Homotopien definieren, beispiels-



MATTED FARNELLA / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2021

Methode, um alle topologischen Objekte zu sortieren. Dieser Traum wird aber unerfüllt bleiben – wie sich herausgestellt hat, gibt es kein solches Verfahren.

Dennoch kann die Fundamentalgruppe Strukturen in niedrigen Dimensionen voneinander unterscheiden, etwa einen Kreis und eine Kreisscheibe. In der Fundamentalgruppe des Ersten finden sich verschiedene Pfade, die man durch ganze Zahlen kennzeichnen kann. Bahnen, die nur einen Abschnitt des Kreises überdecken, lassen sich zu einem Punkt zusammenschrumpfen und entsprechen der Null. Dem entgegen steht eine geschlossene Kurve, die den Kreis einmal umschließt und durch eine Eins dargestellt wird. Ein Pfad kann den Kreis aber auch zwei-, drei-, ...mal umschließen. Keine dieser Varianten lässt sich auf stetige Weise in eine andere überführen. Wenn man ein Haargummi zweimal um einen Kreis wickelt, ist es unmöglich, eine dieser Umdrehungen zu entfernen, ohne

**KREIS** Die Fundamentalgruppe des Kreises besteht aus ganzzahligen Werten.

## Homotopieäquivalenz

Zwei Objekte  $X$  und  $Y$  sind in der Topologie identisch, wenn man sie durch Dehnen, Stauchen, Verbiegen, Verzerren oder Verdrillen ineinander umformen kann. Das kann man durch eine stetige Transformation  $f$  ausdrücken, die jeden Punkt auf  $X$  eindeutig zu einem auf  $Y$  zuordnet und sich umkehren lässt:  $f^{-1}: Y \rightarrow X$ . Die Komposition von  $f$  und  $f^{-1}$  ergibt dabei stets die Identität  $f \circ f^{-1} = 1_Y$  und  $f^{-1} \circ f = 1_X$ .

In der Praxis sind Topologen noch weniger detailversessen. Durch das Konzept der Homotopieäquivalenz setzen sie zwei Objekte  $X$  und  $Y$  gleich, wenn es zwei stetige Abbildungen  $f: X \rightarrow Y$  und  $g: Y \rightarrow X$  gibt, die zwar nicht die jeweiligen Umkehrabbildungen ( $f \circ g \neq 1_Y$ ), aber homotop dazu sind. Führt man also  $f$  und  $g$  hintereinan-

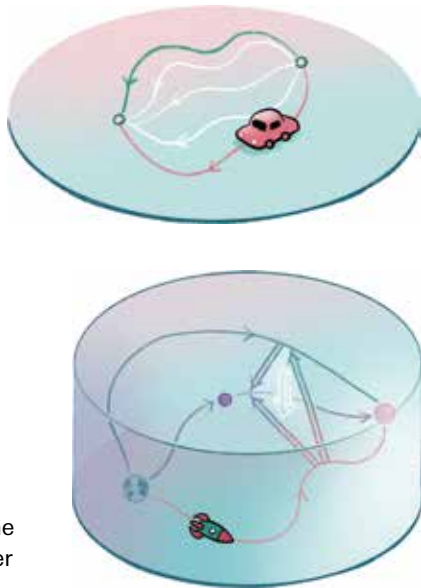
der aus, erhält man nicht  $1_Y$ , jedoch eine Funktion  $h$ , die sich stetig zu dieser umformen lässt.

Im 1-D-Fall ist die Identität  $e(x) = 1$  – eine Gerade, welche die  $y$ -Achse bei 1 schneidet und parallel zur  $x$ -Achse verläuft. Führt man  $f$  und  $g$  nacheinander aus, muss bei einer Homotopieäquivalenz nicht zwingend  $e$  herauskommen, vielmehr ist jede andere Kurve  $h$  möglich, die man stetig zu  $e$  umformen kann, etwa eine Parabel  $x^2$  oder eine Sinuskurve. Komplizierte Kurven wie ein Tangens oder  $1/x$  kommen nicht in Frage: Man müsste  $e(x)$  durchschneiden, damit es deren Form annimmt.

Zwei homotopieäquivalente Räume  $X$  und  $Y$  lassen sich zwar durch eine stetige Transformation ineinander umformen, aber es muss keine Eins-zu-eins-Überein-

stimmung zwischen den Punkten von  $X$  und  $Y$  geben. Das heißt, man kann die Körper auch zusammenquetschen. So lassen sich die Beine einer Hose verkleinern, bis eine eindimensionale Form übrig bleibt, die an einen String-Tanga erinnert. Beide Räume haben die gleiche topologische Struktur (es gibt immer noch zwei Löcher), obwohl das ursprünglich zweidimensionale Kleidungsstück auf eine eindimensionale Schnur geschrumpft ist. Eine andere Homotopieäquivalenz lässt sich erkennen, wenn man die unendliche Weite des dreidimensionalen euklidischen Raums auf einen einzigen Punkt abbildet, wie bei einem umgekehrten Urknall. Tatsächlich können derart »äquivalente« Strukturen auf den ersten Blick extrem unterschiedlich wirken.

**INS UNENDLICHE** Man betrachtet nicht nur Transformationen zwischen Punkten (oben), sondern auch zwischen Morphismen (unten) – und darüber hinaus.



weise kontinuierliche Abbildungen von der dreidimensionalen Kugel auf  $X$ , und in ähnlicher Weise für andere Kugeln in vier, fünf, sechs oder mehr Dimensionen.

Besonders interessant wird es, wenn man all die Punkte, Pfade und Homotopien zu einer einzigen algebraischen Struktur verbindet, also in einen gemeinsamen Raum packt. Dieser heißt  $\pi_\infty(X)$ , das  $\infty$ -Fundamentalgruppoid von  $X$ . Dabei handelt es sich um eine  $\infty$ -Kategorie, eine unendlich-dimensionale Erweiterung von Eilenbergs und Mac Lanes ursprünglicher Idee. Wie die gewöhnlichen Versionen besteht eine  $\infty$ -Kategorie aus Objekten und Morphismen, die sich als eindimensionale Pfeile darstellen lassen. Zudem enthält sie aber auch höhere Transformationen, so genannte  $n$ -Morphismen, die man durch  $n$ -dimensionale Pfeile abbilden kann. Wie in herkömmlichen Kategorien kann man sie zusammensetzen:  $f: X \rightarrow Y$  und  $g: Y \rightarrow Z$  ergeben kombiniert  $g \circ f: X \rightarrow Z$ . Allerdings ist die Komposition in  $\infty$ -Kategorien nicht eindeutig.

### Zu kompliziert und zu abstrakt

Eines der wichtigsten Axiome in der gewöhnlichen Kategorientheorie ist die Existenz einer eindeutigen Komposition  $g \circ f: X \rightarrow Z$  für jedes Paar von Morphismen  $f: X \rightarrow Y$  und  $g: Y \rightarrow Z$ . In einer  $\infty$ -Kategorie gibt es hingegen eine ganze Menge an Pfeilen, die von  $X$  nach  $Z$  führen. Sie lassen sich im  $\infty$ -Fundamentalgruppoid als eine Art »Pfadaum« verstehen. Die Eindeutigkeit geht in unendlich vielen Dimensionen also verloren. Dennoch ist der entstehende Pfadaum nicht völlig beliebig: Die zusammengesetzten Pfade sind alle homotop zueinander. Das heißt, man kann sie stetig ineinander umformen.

In der klassischen, mengenbasierten Welt der Mathematik stellt das ein Problem für die Definition von  $\infty$ -Kategorien dar. Denn die Komposition lässt sich nicht mehr als Operation auffassen, die jenen aus der universellen Algebra ähnelt. Das ist einer der Gründe, warum manche Fachleute das Konzept der  $\infty$ -Kategorien als zu kompliziert und abstrakt ablehnen. Denn konkrete Ergebnisse wie die Lösung einer Differenzialgleichung kann das Gebiet nicht liefern. Tatsächlich findet man  $\infty$ -Kategorien nur selten in

den Lehrplänen der Universitäten, und es gibt viele Mathematiker, die niemals Kontakt damit hatten.

Dennoch sehe ich  $\infty$ -Kategorien als revolutionäre Methode an, die es ermöglicht, neue Zusammenhänge zu entdecken, die sonst unmöglich zu beweisen wären. Und mit dieser Auffassung stehe ich nicht allein da:  $\infty$ -Kategorien sind für die moderne Forschung in vielen naturwissenschaftlichen Bereichen – von der Quantenfeldtheorie über die algebraische Geometrie bis hin zur Topologie – zunehmend von zentraler Bedeutung. Die Geschichte legt nahe, dass man selbst die exotischste Mathematik von heute irgendwann als einfach genug ansehen wird, um sie künftig im Studium zu lehren.

Die abgeschwächte Einzigartigkeit aus  $\infty$ -Kategorien findet inzwischen auch außerhalb des Bereichs Anwendung. Zum Beispiel schlug Vladimir Voevodsky (1966–2017) zusammen mit Kollegen vor, das Prinzip für ein neues Grundlagensystem der Mathematik zu nutzen. Statt der Mengenlehre sollten demnach Ideen aus der Kategorientheorie das Fundament bilden. Eng damit verbunden sind auch computergestützte Beweisassistenten, die formale Beweise Zeile für Zeile überprüfen. Die Programme übertragen die Informationen über ein Objekt auf ein anderes, das als dasselbe verstanden wird.

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema: [spektrum.de/t/unendlichkeit](https://www.spektrum.de/t/unendlichkeit)



WIGGLESTICK / GETTY IMAGES / ISTOCK

Abstraktion kann also durchaus dabei helfen, verschiedene Konzepte besser zu verstehen. Wenn die Mathematik die Wissenschaft der Analogie ist, das Studium der Muster, dann ist die Kategorientheorie das Studium der Muster des mathematischen Denkens – die »Mathematik der Mathematik«, wie meine Kollegin Eugenia Cheng vom School of the Art Institute of Chicago es ausgedrückt hat.

Viele Details sind von dieser Ebene aus unsichtbar, etwa numerische Näherungen oder überhaupt alles, was mit Zahlen zu tun hat. Aber es ist bemerkenswert, dass Theoreme in Algebra, Mengenlehre, Topologie und Geometrie manchmal aus den gleichen Gründen wahr sind. Wenn das der Fall ist, lassen sich diese Beweise in der Sprache der Kategorientheorie ausdrücken. ◀

### QUELLEN

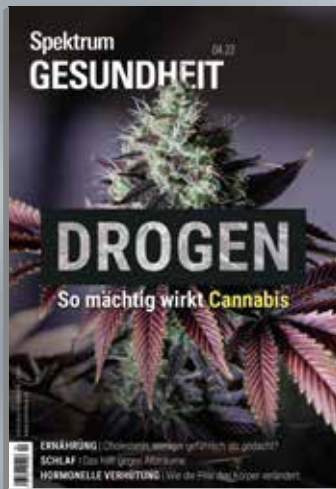
**Baez, J.:** An introduction to n-categories. In: Moggi, E., Rosolini, G. (Hg.): Category Theory and Computer Science. Springer, 1997, S. 1–33

**Cheng, E.:** How to bake Pi: Easy recipes for understanding complex maths. Profile Books 2019

**Riehl, E., Verity, D.:** Infinity category theory from scratch. ArXiv 1608.05314, 2016

# Unsere Neuerscheinungen

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



Informationen und eine Bestellmöglichkeit  
zu diesen und weiteren Neuerscheinungen:  
[service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de) | Tel. 06221 9126-743  
[Spektrum.de/aktion/neuerscheinungen](https://www.spektrum.de/aktion/neuerscheinungen)



FRANZI SCHÄREL / FLORIAN FREISTETTER (F. PRESSE) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVE COMMONS ORIGINALS) (BY-SA) (0.1LEGALCODE)

# FREISTETTERS FORMELWELT ORDNUNG IM CHAOS

**Selbst dort, wo der Zufall regiert, gelten oft einfache Gesetze. Und zwar gerade dann, wenn auch noch unüberschaubar große Zahlen ins Spiel kommen.**

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

► [spektrum.de/artikel/2008783](https://spektrum.de/artikel/2008783)

Die sekundengenaue Vorhersage einer Sonnenfinsternis ist aus zwei Gründen möglich. Erstens: Die Bewegung der Himmelskörper folgt einem Naturgesetz. Zweitens: Wir sind in der Lage, ihr Verhalten mathematisch zu beschreiben. Dadurch kann man den Verlauf von Sonne, Erde und Mond auch für die Zukunft berechnen.

Inzwischen erscheint dieser Prozess recht einfach – obwohl es durchaus eine wissenschaftliche Revolution war, als Isaac Newton im 17. Jahrhundert erstmals die Planetenbahnen in Bewegungsgleichungen fasste. Was aber, wenn man es nicht mit einer Hand voll Planeten zu tun hat, sondern mit einer unvorstellbar großen Anzahl winziger Atome oder Moleküle? Kann man auch deren Bewegungen vorhersagen?

Ja und nein. Einzelne Teilchen lassen sich im Rahmen der Quantenmechanik präzise untersuchen. Bei sehr vielen davon wird es jedoch schwierig. Ein Kubikzentimeter Luft enthält dutzende Trillionen Stickstoffmoleküle, ein paar Trillionen Sauerstoffmoleküle, und dazu kommt noch der ganze Rest an Stoffen, die unsere Atmosphäre ausmachen. Es erscheint geradezu unmöglich, die Bewegung all dieser Teilchen zu beschreiben und vorherzusagen. Trotzdem verstehen wir recht gut, wie sich Gase verhalten, indem man zum Beispiel diese Formel verwendet:

$$p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T$$

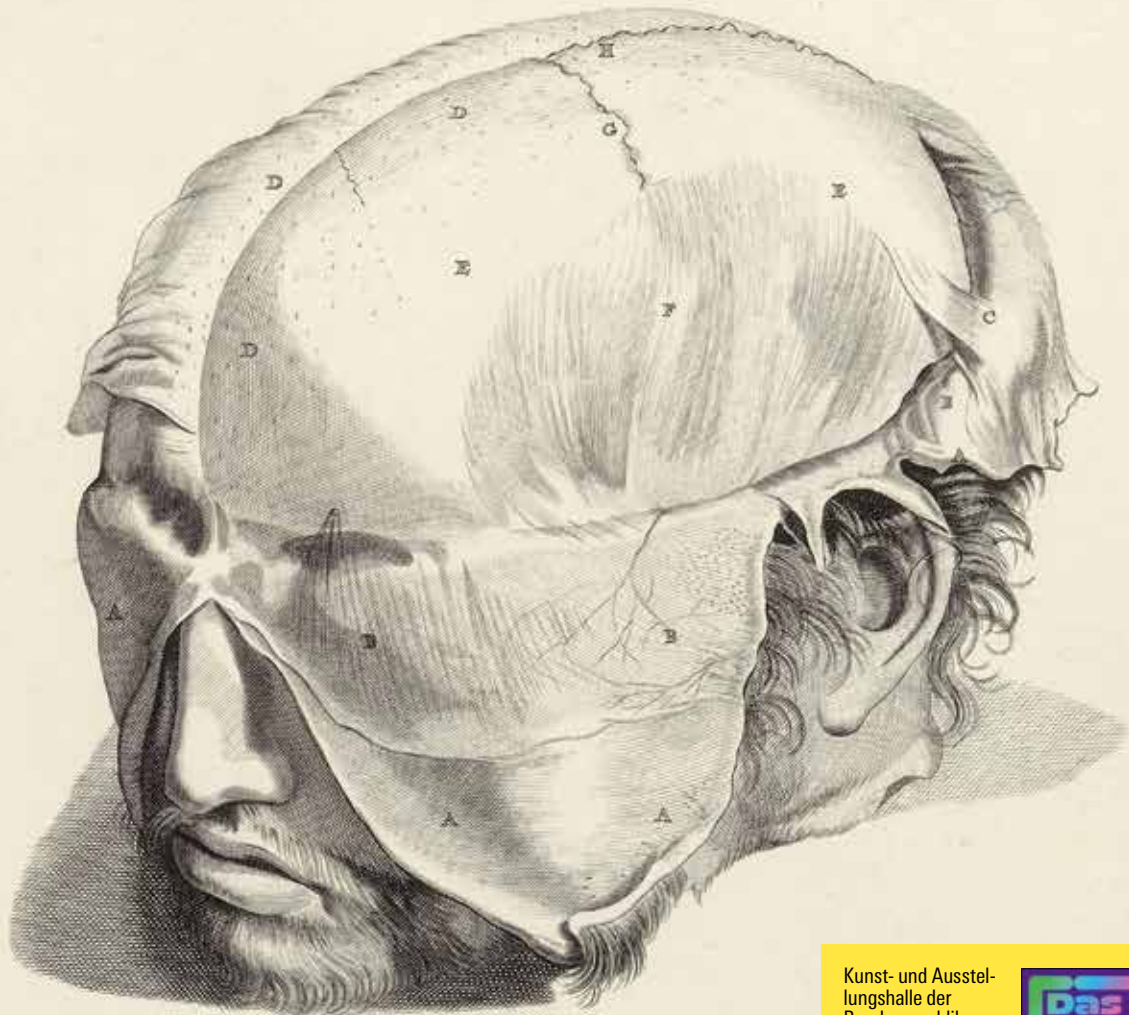
Das ist eine Formulierung der »thermischen Zustandsgleichung idealer Gase«, oft als »ideale Gasgleichung« abgekürzt. Sie beschreibt, wie der Druck  $p$ , das Volumen  $V$ , die Teilchenzahl  $N$  und die Temperatur  $T$  eines Gases zusammenhängen – verknüpft mit der Boltzmann-Konstante  $k_B$ . Bleiben etwa die Menge an Teilchen und die Temperatur unverändert, dann gilt das auch für das Produkt aus Druck und Volumen. Oder

anders gesagt: Erhöht man den Druck auf eine Gasmenge, zieht sie sich zusammen; verringert man hingegen den Druck, dehnt sie sich aus (das ist das »Boyle-Mariotte-Gesetz«).

Zwar ist es praktisch unmöglich, jedes einzelne Teilchen eines Gases zu beschreiben. In Summe und mit entsprechenden statistischen Methoden kann man aber durchaus vernünftige Aussagen treffen, wodurch sich Gesetze wie die ideale Gasgleichung formulieren lassen. Es ist beispielsweise möglich, den Druck, der in einer Gasflasche herrscht, durch die Stöße zu modellieren, die zwischen den Partikeln und der Wand des Behälters stattfinden. Wann, wo und wie ein einzelnes Gasmolekül auf die Innenseite der Flasche trifft, lässt sich allerdings nicht vorhersagen. In Summe wird es jedoch umso mehr Stöße geben, je schneller sich die Teilchen bewegen, und da ihre Geschwindigkeit von der Temperatur abhängt, lassen sich mit den Methoden der statistischen Physik entsprechende Beziehungen aufstellen.

Man übersieht leicht, wie erstaunlich es ist, dass simple mathematische Gesetze ein Gas beschreiben, obwohl es aus unzähligen Teilchen besteht, deren Bewegung nicht präzise fassbar ist. Dem US-amerikanischen Sciencefiction-Autor und promovierten Biochemiker Isaac Asimov war das aber durchaus klar. In seinem berühmten »Foundation«-Zyklus schuf er die fiktive Wissenschaft der »Psychohistorik«. In den Büchern entwickelt sie die Figur Hari Seldon, ein Mathematiker, der damit in der Lage ist, sehr genaue Prophezeiungen über das Verhalten von Menschenmengen zu machen. Zum Beispiel sagt er so den Untergang des galaktischen Imperiums voraus, womit die Handlung der Geschichte startet.

Asimov hat sich bei seiner fiktiven Wissenschaft von der realen Gaskinetik inspirieren lassen. Was ein einzelner Mensch tun wird, lässt sich nicht berechnen. Doch wenn die Menge groß genug ist, sind exakte Aussagen möglich – zumindest in der Welt der Sciencefiction.



PIETER VAN GONST: ANATOMISCHE UNTERSUCHUNG DES KOPFES. 1685. KUPFERSTICH. RIJKSMUSEUM AMSTERDAM.  
AUS: DAS GEHIRN IN KUNST UND WISSENSCHAFT, MIT ILL. GER. DES INNENVERLAGS

Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland

**DAS GEHIRN!**

In Kunst und Wissenschaft  
Hirner, München  
2022

272 S., € 34,90



## KULTUR 300 KUNSTWERKE IM INTERDISZIPLINÄREN DIALOG

Die Ausstellung »Das Gehirn« baut eine Brücke zwischen Kunst und Wissenschaft. Das begleitende Werk beleuchtet die fachlichen Hintergründe auf gelungene Weise.

► Das Buch »Das Gehirn in Kunst & Wissenschaft« entführt in die gleichnamige Ausstellung der Bundeskunsthalle in Bonn, die vom 28. Januar 2022 bis zum 26. Juni 2022 stattfindet – und ist gleichzeitig ein Kunstwerk für sich. Es widmet sich zuerst den Anfängen der Erforschung unseres Denkkorgans, die bis in die Mittelsteinzeit zurückreicht.

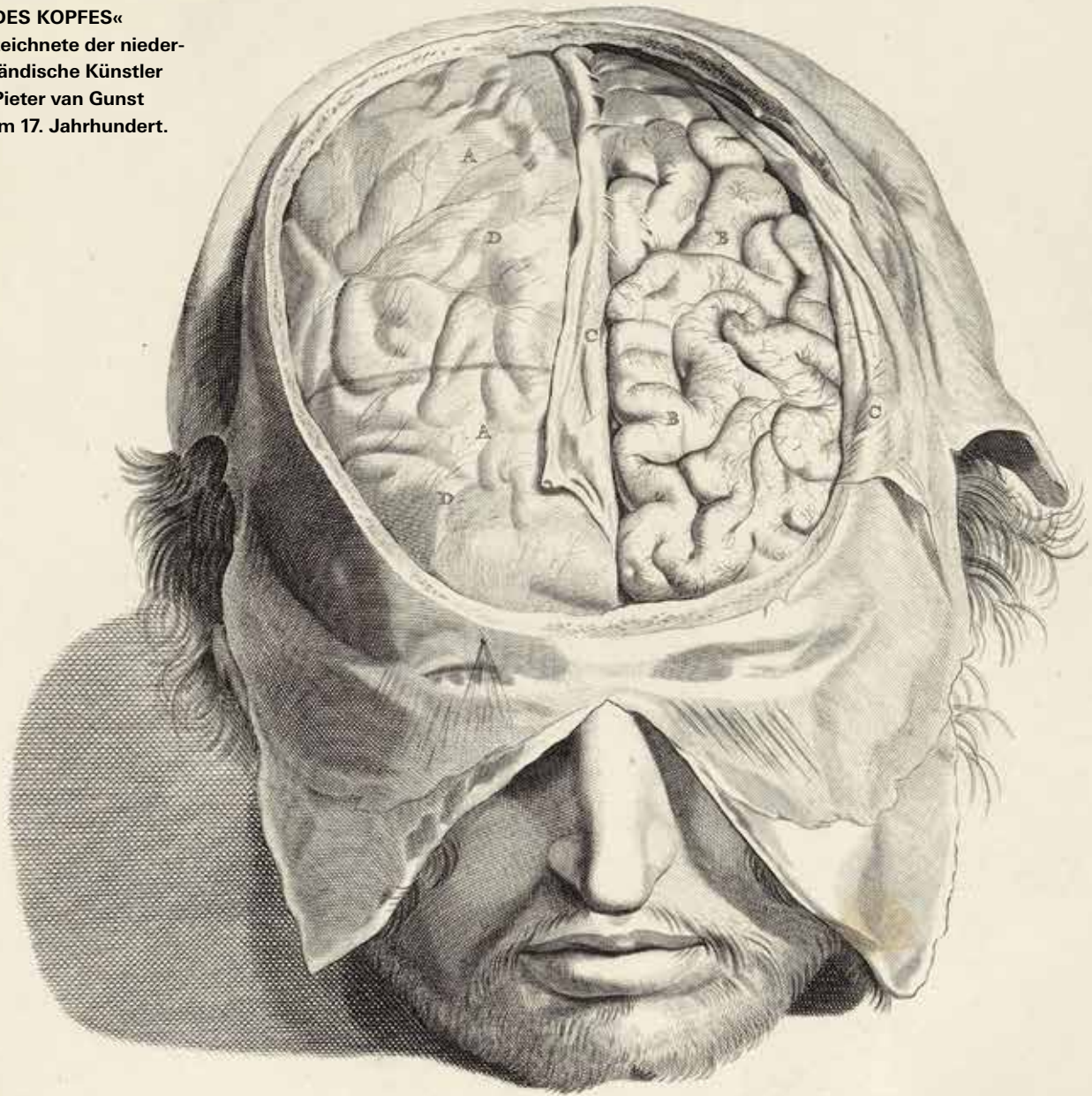
Schädelknochen mit Bohrlöchern als erste Beispiele der Trepanation zeugen

davon. Aus dieser frühen Zeit führt es die Leserinnen und Leser in die nähere Vergangenheit, als Wissenschaftler – aus heutiger Sicht verrückte – Versuche durchführten, um die Funktionsweise des menschlichen Gehirns zu verstehen.

Und schließlich erläutern die Autorinnen und Autoren die erstaunlichen Untersuchungsmethoden, die heute verfügbar sind, und wagen einen Blick in die Zukunft.

»ANATOMISCHE  
UNTERSUCHUNG  
DES KOPFES«

zeichnete der nieder-  
ländische Künstler  
Pieter van Gunst  
im 17. Jahrhundert.



PIETER VAN GUNST: ANATOMISCHE UNTERSUCHUNG DES KOPFES. 1686. KUPFERSTICH. RIJKSMUSEUM AMSTERDAM.  
AUS: DAS GEHIRN IN KUNST UND WISSENSCHAFT, MIT FRIL. GEB. DES HIRNEN VERLAGS

Neben der Geschichte des Organs widmet sich das Buch Themen, die sich zwischen psychischen Erkrankungen, optischen Illusionen, Zaubertricks, Neuroenhancern und KI bewegen. Es liefert dabei ganz nebenbei eine Analyse unserer Gesellschaft in verschiedenen Epochen anhand der jeweils vorherrschenden Kulturen und Vorstellungen.

In der interdisziplinären Erzählung stehen Hirnforschung, Philosophie,

Kulturwissenschaft und Sciencefiction gleichberechtigt nebeneinander. Der Katalog integriert zudem aktuelle Erkenntnisse, die sich oft noch nicht überall durchgesetzt haben: etwa, dass beide Hirnhälften stets zusammenarbeiten und nichts nur einseitig passiert. Ebenso Erstaunliches fördern die Autoren und Autorinnen zu Tage, wenn sie in einer Reportage über den Neuropsychologen Hans-Otto Karnath die hoch gelobten Berichte und Erzäh-

lungen Oliver Sacks' als »alte Hüte« entlarven.

Kurze Episoden von renommierten Wissenschaftlern wie Gerhard Roth, John-Dylan Haynes sowie Michael Pauen (der eine philosophische Perspektive einbringt) beleuchten das Organ aus verschiedenen Blickwinkeln. Aber auch die Erfahrungen einer Neurochirurgin, die bei ihren Operationen am Gehirn mit Patienten spricht, liefern spannende Einblicke. Neben

Interviews lockern Essays oder Erfahrungsberichte den Inhalt auf. Zum Beispiel wird geschildert, wie sich ein weiterer Sinn anfühlt, der die Richtung von Norden anzeigt; und wie das Auskunft darüber gibt, wie Körper und Geist gemeinsam unsere qualitative Wahrnehmung erschaffen.

Auf diese Weise bringt das Buch die Leserinnen und Leser auf den neuesten Stand der Hirnforschung. Dabei räumt es zuweilen mit Vorurteilen auf, etwa mit der verbreiteten Fehlannahme, wir würden nur zehn Prozent unseres Gehirns nutzen. Zudem verschafft das Werk neue Perspektiven auf Krankheiten des Organs. So erzählen Malereien von psychisch Erkrankten vielleicht nachvollziehbarer von deren Sicht auf die Welt, als es ein Wissenschaftler zu erklären vermag.

Jedes der vielen abgedruckten Kunstwerke enthält einen Begleittext, der nicht nur Entstehungszeit und genutzte Technik nennt, wie es in Ausstellungen üblich ist, sondern ebenso beschreibt, was den Kunstschaffenden zu dem Werk motiviert hat und was es ausdrücken soll. Wer ein Smartphone bei der Lektüre zur Hand hat, kann an den vielen interaktiven Features Spaß haben: Zum Beispiel findet sich eine Animation davon, wie eine Eisenstange bei einem Unfall das Gehirn des Eisenbahnvorarbeiters Phineas Gage (1823–1860) durchbohrte. In der Folge litt er unter einer starken Persönlichkeitsveränderung, die sich in aggressivem und enthemmtem Verhalten ausdrückte, was ihn seinerzeit zum beliebten Forschungsobjekt machte. Mit dem Handy lässt sich die ganze Ausstellung sogar virtuell in 3-D besuchen.

Das schrille Cover täuscht über den fundierten Inhalt hinweg, der Kunst und Wissenschaft gekonnt miteinander verbindet. Damit zieht das Buch selbst Personen, die eigentlich nicht allzu kunstinteressiert sind, in seinen Bann. Für wissbegierige Sachbuchfans ist der Band eine neue Erfahrung der Annäherung an unser Denkgorgan, der nicht an Tiefe missen lässt.

Elisabeth Stachura ist promovierte Soziologin und Wissenschaftsjournalistin in Bremen.

## PHYSIK CHAOS IM PHYSIK- UNIVERSUM

**Der ehemalige Astronaut Ulrich Walter präsentiert in seinem Buch eine erratische Auswahl an Naturphänomenen.**

► Die Wissenschaft ist wie der Turmbau zu Babel. Mit jedem weiteren Stein, den wir dem Turm hinzufügen, wollen wir den ewigen Wahrheiten des Universums näherkommen. Aber wir werden nie ein Ende erreichen. Da ist sich Ulrich Walter, Physiker und ehemaliger Astronaut, sehr sicher.

Einige der Steine, die den Turm schon heute stützen, präsentiert der Verfasser in seinem neuen Buch »Die verrückte Welt der Physik« einem breiten Publikum. Gleich am Anfang warnt er: Ganz ohne Mathematik werde er nicht auskommen. Es werde einige Formeln zu seinen Erklärungen geben, die jedoch alle auf Schulwissen basieren.



Die Zusammenstellung der Themen des Buchs wirkt ein wenig so, als hätte sich ein Physiker gedacht: Was müssen die Leute unbedingt über das wissen, was die Welt zusammenhält? Und so wechselt Walter scheinbar erratisch von der newtonschen Gravitation zur eher akademisch geprägten Teilchenphysik und dann wieder zu Astro-Phänomenen, die man von der Erde aus beobachten kann.

Zum Beispiel springt der Autor von der Frage, ob ein dicker oder ein dünner Mensch schneller von einem Sprungturm herunterfällt, gleich zur

Bedeutung des Higgs-Teilchens für die Kosmologie und von dort aus direkt zur Stringtheorie auf der Suche nach der Weltformel. Zu guter Letzt unternimmt er dann einen Ausflug in die Epigenetik und beschäftigt sich damit, wie psychosoziale Belastungen unseren Lebensweg beeinflussen.

Strukturierter wird es im zweiten Teil des Buchs. Hier geht es um die »Physik im Großen«. Walter nimmt den Leser mit auf Exkursionen in den Weltraum. Mit diesem ist er zweifelsohne stark verbunden, war er doch selbst im Jahr 1993 an Bord des Spaceshuttles »Columbia«. Der Autor erzählt von der Suche nach Leben im All und erklärt, was es mit einem Supermond auf sich hat, den man von der Erde aus beobachten kann. Dann beschäftigt er sich mit Dunkler Materie. Da ist es wie verhext, schreibt er. Seit mehr als 100 Jahren suchen wir erfolglos nach einer exotischen Art von Materie, von der wir wissen, dass sie 84 Prozent unseres Universums ausmacht, weil sie die Drehung von Galaxien wesentlich beeinflusst.

Am Ende des Taschenbuchs unternimmt Walter einen Ausflug in die Technik des Alltags. Er erklärt, warum Flugzeuge fliegen, weshalb Eis glatt ist oder wie man Fußballergebnisse voraussagen kann.

Die Leserinnen und Leser erwartet eine unterhaltsame, durchaus spannende Lektüre. Der Autor versteht es, durch seinen Schreibstil zu fesseln, trotz einiger eingestreuter mathematischer Formeln, auf die man aber auch gut hätte verzichten können. Wer sich gern etwas chaotisch durch die unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen treiben lassen möchte, die – entgegen der Ankündigung im Titel – nicht unbedingt alle Physik zur Grundlage haben, wird durchaus eine kurzweilige Zeit verbringen. Spannung entsteht beim Lesen schon allein dadurch, dass man kaum erraten kann, worum es im nächsten Kapitel geht. Das ist in etwa so unberechenbar, wie es (trotz aller Mathematik und allen Fachwissens) ein Fußballspiel immer bleiben wird, lieber Herr Walter.

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





## UMWELT ENDE DER ROMANTIK

**Der Reporter Nathaniel Rich sammelt Reportagen rund um menschliche Eingriffe in die Natur und ihre teils verheerenden Folgen.**

Das romantische Bild unberührter Natur existiert noch immer in den Köpfen vieler und wird nicht selten für Werbezwecke genutzt. Dass diese Vorstellung in einer Welt, in welcher der Mensch die Umwelt massiv beeinflusst hat, nicht haltbar ist, möchte der Journalist und Schriftsteller Nathaniel Rich mit seinem Buch »Die zweite Schöpfung« zeigen.

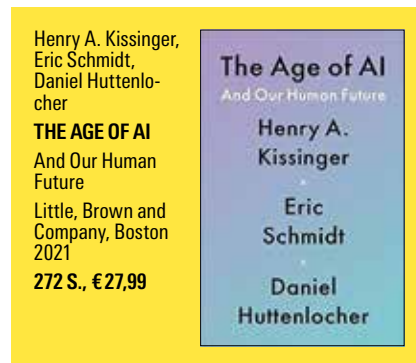
In Reportagen geht er auf drei Facetten des Themas ein: Verbrechen, die der Mensch an der Natur begangen hat, Zweifel, welche die oft schädlichen Eingriffe hervorrufen, und Versuche, eine lebenswertere Zukunft zu gestalten.

Besonders der erste Teil des Werks überzeugt. Eindrücklich schildert Rich Umweltskandale wie die des US-Chemiekonzerns Dupont durch die Augen jener, die unter ihnen gelitten und sie aufgedeckt haben. Das genannte Unternehmen hatte jahrzehntelang die giftige Chemikalie PFOA – bekannt aus der Herstellung des Kunststoffes Teflon – unsachgemäß in West Virginia entsorgt. Dabei wusste man, dass die Substanz unter anderem im Verdacht steht, Krebs auszulösen. So gelangte PFOA ins Trinkwasser von unzähligen US-Bürgerinnen und -Bürgern. Wegen der Exporte von Dupont haben heute sogar weltweit viele Personen die Chemikalie im Blut.

Leider verliert das Buch nach dem starken Einstieg etwas an Spannung. Auch die Erkenntnis, dass der Mensch die Natur extrem und teilweise zu seinem eigenen Nachteil beeinflusst, ist alles andere als neu. Interessant wird die Lektüre aber erneut, wenn der Autor zeigt, wie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit fortschreitenden technologischen Möglichkeiten einen Teil des Schadens wieder beheben wollen.

So arbeitet beispielsweise ein US-amerikanisches Forschungsteam schon seit Jahren daran, die ausgestorbene Wandertaube wiederzubeleben. Rich bewertet solche Vorhaben erfreulicherweise nicht und zählt lediglich die Argumente ihrer Befürworterinnen und Gegner auf. Gleichzeitig macht er aber deutlich, welche Motive seiner Meinung nach hinter so ambitionierten Projekten stecken: die Wünsche einzelner Menschen, auch in Zukunft weiter auf die Natur einzuwirken – denn eine Rückkehr zum Status quo gibt es nicht.

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



## DIGITALISIERUNG AUF DEM WEG IN EINE NEUE WISSENS- GESELLSCHAFT?

**Der ehemalige US-Außenminister Henry Kissinger, Ex-Google-CEO Eric Schmidt und der Informatikprofessor Daniel Huttenlocher beschreiben ihre Sicht auf das Zeitalter der KI.**

Zum Thema künstliche Intelligenz ist in den vergangenen Jahren eine Flut von Sachbüchern erschienen. Einige sind leichtgängig, andere wiederum sehr sperrig geschrieben, was sich angesichts der Technizität des Gegenstands wohl nicht vermeiden lässt, doch auf Dauer ermüdend wirkt. Wenn aber ein Elder Statesman zur Feder greift, schenkt man dem Werk schon wegen des biografischen Hintergrunds des Autors Beachtung. So auch im Fall des englischsprachigen Buchs »The Age of AI«, das der ehemalige US-amerikanische Außenminister Henry A. Kissinger gemeinsam mit dem Ex-Google-CEO Eric Schmidt und dem Informatikprofessor Daniel Huttenlocher vorgelegt hat.

Kissinger hat 2018 in der US-Zeitschrift »The Atlantic« einen viel beachteten geschichtsphilosophischen Aufsatz mit dem Titel »How the enlightenment ends« (deutsch: Wie die Aufklärung endet) publiziert, in dem er die These aufstellt, dass KI im Zusammenspiel mit der Datenflut zu einer neuen Verrätselung der Welt führen könnte.

Das Buch lässt sich als Fortsetzung des Essays verstehen. Zwar formuliert es nicht den Anspruch einer neuen »Dialektik der Aufklärung« (Theodor W. Adorno und Max Horkheimer), kann jedoch in diese Richtung gelesen werden. In sieben Kapiteln vermisst das Autorentrio das Thema: von den geistesgeschichtlichen Voraussetzungen über den aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstand bis hin zur globalen Sicherheitsordnung. Letzteres trägt klar die Handschrift des ehemaligen US-Außenministers.

Das interessanteste Kapitel ist das über die menschliche Identität. Künstliche Intelligenz, so die These der Autoren, könnte das humanistische Weltbild in seinen Grundfesten erschüttern. Jahrhundertlang hätte der Mensch sich »in der Mitte der Erzählung platziert«. Doch jetzt gäbe es Werkzeuge, die Aufgaben übernehmen, die bislang die Domäne des menschlichen Verstands waren – zum Beispiel Schreiben, Malen oder Komponieren. Damit verändere sich nicht nur das Selbstverständnis des Men-

schen, seine Rolle, sein Bestreben, seine Erfüllung, sondern auch seine Annahmen über die Welt und seinen Platz darin.

So wie die Vernunft die Forschung revolutionierte und die feudale Ordnung zu Fall brachte, könnte KI nun abermals eine gesellschaftliche Umwälzung hervorrufen. Automatisierte Entscheidungssysteme, wissenschaftliche Entdeckungen und lebenslanges Lernen sind nur ein paar Beispiele, in denen KI-Systeme schon heute bestehende Ordnungen herausfordern. Mit dem zunehmenden Einsatz dieser Instrumente stelle sich allerdings auch die Frage nach der Autonomie und Würde des Menschen.

Lautete das Diktum der Aufklärung »Sapere aude« (»Habe Mut, dich deines eigenen Verstandes zu bedienen«), gibt es nun Softwareagenten, die – wie etwa der Google-Algorithmus – Informationen filtern und vorsortieren. Und diese Maschinen operieren nicht nach Maßgabe menschlicher Vernunft, sondern nach einer rein mathematischen, einprogrammierten Logik. Mit Folgen: »KI wird unsere Vorstellung von dem, was wir wissen, woher wir etwas wissen und sogar das, was überhaupt erkennbar ist, tief greifend verändern«, schreibt das Autorentrio.

Kann die Prämisse der Aufklärung, das vernunftgeleitete Denken, noch Bestand haben, wenn uns eine Maschine das Denken mehr und mehr abnimmt? Leben wir in Zukunft in derselben Realität, was Voraussetzung für eine demokratische Öffentlichkeit ist?

Die Autoren sehen KI als ambivalentes Werkzeug, dessen Auswirkungen auf das menschliche Wissen »paradox« sei. Einerseits erschließen KI-Systeme durch die systematische Analyse großer Datenmengen und Mustererkennung neues Wissen, etwa Medizindiagnosen oder Vorboten einer Umweltkatastrophe. Andererseits schränken sie durch maßgeschneiderte Informationen den Zugang zur Realität ein und untergraben die Fähigkeit des Menschen zur kritischen Nachfrage. Die Autoren warnen daher davor, die »Verkündungen der KI« als »quasi-göttliche Urteile« zu interpretieren.

Zwischen einer neuen Wissensgesellschaft, in der KI-Systeme den Erkenntnisfortschritt beschleunigen und Fakten ans Licht bringen, und einem »Dark Age«, in dem algorithmische Autoritäten Menschen bevormunden und keine objektive Wahrheit mehr existiert, liegt ein schmaler Grat. »Im Zeitalter der KI wird der menschliche Verstand also sowohl erweitert als auch reduziert«, resümieren die Autoren. Ob wir uns als Gesellschaft auf eine Art Aufklärung 2.0 zubewegen, das lernt man in diesem anregenden und geistreichen Buch, ist am Ende keine Frage künstlicher, sondern menschlicher Intelligenz.

Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg und ist Autor der Kolumne »Lobes Digitalfabrik« auf »Spektrum.de«.



## ANTIKE NERO RELOADED

**Eines der bekanntesten Ereignisse der römischen Geschichte ist der Brand Roms, den Kaiser Nero verursacht haben soll. Doch welche Fakten sind historisch gesichert?**

► Für Menschen, die mit den farbenprächtigen Hollywood-Monumentalfilmen groß geworden sind, hat der römische Kaiser Nero ein unverwechselbares Gesicht. In dem US-amerikanischen Blockbuster »Quo vadis« aus dem Jahr 1951 ist es Sir Peter Ustinov, der als Wahnsinniger mit der Leier in der Hand das brennende Rom besingt. Ein unvergesslicher Moment der Filmgeschichte. Und selbst jüngere Generationen werden eine Verbindung zwischen der Zerstörung Roms und Nero durch das gleichnamige CD- und

DVD-Brennprogramm herstellen können. Neben Julius Cäsar und Kaiser Augustus gibt es wenige römische Herrscher, die so stark ins kulturelle Gedächtnis eingedrungen sind.

Der Althistoriker Anthony A. Barrett unterzieht in seinem Buch »Rom brennt!« die Herrschaft Neros und das entscheidende Ereignis seiner Zeit, den Brand der Hauptstadt im Jahr 64 n. Chr., einer gründlichen Revision. Dies scheint, gerade im Blick auf das kulturelle Gedächtnis, wirklich nötig zu sein: ein wahnsinniger Kaiser, der Rom in Brand setzt, um es dann nach seinen Vorstellungen neu aufzubauen. Und bei der Gelegenheit schiebt er der noch sehr jungen christlichen Gemeinde die Schuld in die Schuhe, um sie grausam zu bestrafen – lässt sich dieses fest eingeprägte Bild historisch nachweisen?

Zunächst mag es überraschen, dass man erstaunlich wenig über die genaue Opferzahl oder den Ablauf des Brandes weiß. Die politische Dimension der Katastrophe ist hingegen bekannt, da die zeitgenössischen Quellen sehr daran interessiert waren, Nero als verantwortungslosen Schurken darzustellen, dem man es sogar zutraute, Rom selbst angezündet zu haben, um eigene Bauprojekte durchzuführen. Dieser politische und gesellschaftliche Aspekt des Feuers löste nachfolgende Umbrüche in der römischen Geschichte aus.

Hatte der Kaiser bis dahin im Volk und im Senat stets einen guten Ruf genossen, änderte sich das durch die Anschuldigungen. Der Bruch mit der mächtigen Elite führte vier Jahre später zu Neros Freitod und damit zum Ende der julisch-claudischen Herrscherdynastie.

Dabei schien es keine objektiven Beweise für die Schuld des Kaisers zu geben. Dennoch hatte sich am Ende des 1. Jahrhunderts die Ansicht verfestigt, Nero sei für den Brand verantwortlich gewesen. Das Bild des singenden Herrschers, der das brennende Rom als Theaterkulisse nutzt, war beispielsweise anfangs nicht mehr als ein Gerücht, wandelte sich aber in den Quellen im Lauf der Zeit zu einer Tatsache. Die damaligen Historiker

## Ein Kaiser setzt Rom in Brand, um es nach seinen Vorstellungen aufzubauen

hatten kein Interesse daran, es sich mit den nachfolgenden Machthabern zu verscherzen, die sich in Kontrast zur bösen Herrschaft Neros sahen, und kolportierten die Erzählungen einfach.

Die Grundthese Barretts lautet, dass es etwas Besonderes mit dem Brand auf sich hatte, wenn er so starke Verwerfungen in der römischen Gesellschaft nach sich ziehen konnte. Denn Feuer waren in Rom nichts Ungewöhnliches. Seit dem Jahr 6 n. Chr. gab es eine Feuerwache, die »vigiles«. Und der Satiredichter Juvenal beschrieb Brände neben Gebäudeeinstürzen und Dichterlesungen als einen der drei Schrecken, die Rom immer wieder heimsuchten. Auch war es geläufig, dass man – wie nach jeder großen Katastrophe – einen Sündenbock suchte. Schließlich sah man Brände in der Antike nicht bloß als zufälliges Unglück an, sondern als ein Zeichen der Götter und Strafe für Fehlverhalten.

Das führt zu der zweiten großen Frage, die sich im Zusammenhang mit dem Ereignis stellt: Hat Nero, um von seiner Schuld abzulenken, tatsächlich die Christen beschuldigt, verfolgt und bestraft? Die genaue Quellenanalyse Barretts kommt zu einem interessanten Ergebnis: Außer einer Textpassage in den berühmten Annalen des Historikers Tacitus (58–120 n. Chr.) findet sich keine einzige Quelle vor dem 5. Jahrhundert n. Chr., welche die Christen mit dem Unglück in Rom in Verbindung bringt. Und bei einer genaueren Betrachtung der Textstelle fällt auf, dass die Bestrafung der Religionsgemeinschaft nicht zwangsläufig eine Folge des großen Brands war. Wahrscheinlicher ist, dass Tacitus entweder

zwei unabhängige Vorfälle miteinander kombiniert hat oder dass ein christlicher Autor im 4. Jahrhundert diesen Text nachträglich eingefügt hat.

Das Buch gibt einen umfassenden Überblick über das prägende Kapitel der römischen Geschichte. Es liefert tiefe Einblicke in die Gedankenwelt der damaligen Zeit, und es ist spannend zu beobachten, wie Barrett quasi festgefügte Vorstellungen durch eine genaue Analyse der historischen Texte und der archäologischen Befunde widerlegt. Interessant zu lesen sind in gleicher Weise, wie sich der Brand auf die Wirtschaft des Römischen Reichs, die Stadtplanung und nicht zuletzt die Bautechnik, die anschließend verstärkt auf feuerfeste Materialien wie Zement setzte, ausgewirkt hat.

Für Laien wird das Lesen durch die vielen ausführlichen Beschreibungen und Argumentationen in einigen Kapiteln womöglich ein wenig mühsam. Aber es steht ja nirgendwo geschrieben, dass die historische Wissenschaft immer einfach ist.

Christian Hellmann ist evangelischer Pfarrer und Journalist in Gelsenkirchen.



## KLIMA DIE KLEINSTE GEMEINSAME KATASTROPHE

**Die Journalistin Sara Schurmann macht klar: Wir erleben keinen Klimawandel, sondern eine Klimakatastrophe. Ihr Buch fasst die Fakten gelungen zusammen, auch wenn ein Alleinstellungsmerkmal fehlt.**

Die Lage ist ernst: Ein Temperaturrekord jagt den nächsten; ausge dehnte Waldbrände in den hohen Breiten sorgen im Sommer für Schlagzeilen, das Ahrtal versinkt 2021 in den Fluten des Starkregens. Zwar sind das Einzelereignisse, aber in der Summe wird klar: Der Klimawandel ist da und die Folgen können verheerend sein. In den meisten Köpfen dürfte das inzwischen angekommen sein. Umso enttäuschender erscheinen mitunter die Maßnahmen – oder besser: Unterlassungen –, die Regierungen rund um den Globus beschließen, um der globalen Erwärmung Einhalt zu gebieten. So mag man berechtigte Zweifel haben, ob mit den Weichenstellungen von heute das 1,5-Grad-Limit noch einzuhalten ist.

Von diesen Zweifeln ist auch die Journalistin Sara Schurmann getrieben, die in ihrem Buch »Klartext Klima!« die Alarmglocken schrillen lässt. Zu Recht. Nach allem, was der Weltklimarat prognostiziert, steuern wir auf ein Desaster zu, bei dem von einem Klimawandel kaum mehr die Rede sein kann, weshalb man von einer Klimakatastrophe sprechen sollte, falls dieser nicht gebremst werde, erklärt die Autorin. Es müssen dringend einschneidendere Maßnahmen her – Fridays for Future bringt diese Forderung lautstark auf die Straße. Und selbst wenn das 1,5-Grad-Ziel eingehalten wird: Auch in diesem Fall ist mit Folgen zu rechnen. Die Grenze lässt sich nur als eine Verständigung auf die »kleinste gemeinsame Katastrophe« sehen. Das macht Schurmann in ihrem Buch sehr deutlich.

In vier Kapiteln stellt die Autorin dar, wie die aktuelle Lage ist, wie es dazu kommen konnte, welche Handlungen erforderlich sind und was wir tun können. So trägt sie eingangs Fakten über den Klimawandel zusammen, in denen sie die naturwissenschaftlichen Grundlagen erklärt, Nichtlinearitäten des Klimasystems schildert und zweifelsfrei klarmacht, dass man den Ausstoß von Treibhausgasen radikal reduzieren muss. In den Folgekapiteln beschreibt sie unter anderem, wie Lobbypolitik in den vergangenen Jahren einen effektiven Klimaschutz

verhindert hat. Sie warnt, dass die sich zuspitzende Krise alle betreffen wird, und räumt mit der Vorstellung auf, technische Lösungen allein könnten einen Weg aus der Misere bieten. In den letzten Kapiteln schließt sich dann der Kreis, und Schurmann führt Maßnahmen an, die man nun dringend umsetzen müsse: unter anderem Emissionen reduzieren sowie eine wirkliche Verkehrs- und Agrarwende.

So richtig und wichtig diese Schritte sind, so sehr stellt sich beim Lesen doch ein doppeltes Déjà-vu-Gefühl ein: einerseits innerhalb des Buchs, wenn die Autorin am Ende erneut Maßnahmen wie Emissionsreduktionen fordert, die sie bereits am Anfang nennt. Andererseits begegnen uns die Themen regelmäßig in fast allen Medien. Schurmann vertritt jedoch die Meinung, die Klimathematik sei in den Redaktionen nur ein Thema von vielen, es bedürfe mehr Expertise, zudem müsse die Klimakrise auch bei allen anderen Berichterstattungen mitbedacht werden.

Aber ist dem nicht längst schon so? Zwei Wochen nach Erscheinen des Buchs setzt sich ein Leitartikel der »Zeit« mit den agrarökonomischen Folgen des Kriegs in der Ukraine und CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedener Bewirtschaftungsformen auseinander. Im Politikteil werden sieben aktuelle Krisen, vom Artensterben über die Pandemie sowie die Klimakrise bis zu Krieg und Flucht, zusammen besprochen.

Zeitgleich findet sich bei »Focus Online« ein Doppelinterview so gegensätzlicher Charaktere wie Formel-1-Pilot Sebastian Vettel und Klima-Aktivistin Luisa Neubauer zur Klimathematik. »FAZ Online« arbeitet das Karlsruher Klimaurteil des Jahres 2021 auf, und selbst »Bild« hat eine Themenseite zum Klimawandel. Schaut man ins Ausland, findet man einen Artikel auf Al Jazeera, der beschreibt, wie der Krieg in der Ukraine den Klimanotstand am Horn von Afrika beschleunigt. Wirklich haltbar ist die Aussage der Autorin also kaum, dass das Klima mit den anderen Nachrichtenthemen nicht hinreichend gemeinsam bedacht werde.

Dass die im Buch besprochenen Aspekte mehrmals auftauchen, schmälert nicht seine Qualität – der Wert liegt in der kompakten, verständlichen und sehr eindringlichen Zusammenstellung der überzeugend vorgebrachten Fakten. Hoffentlich erreicht es auch einen Leserkreis, der die Debatte bisher eher als ein Thema von vielen wahrgenommen hat, denn Zeit zum Handeln bleibt kaum noch.

Tim Haarmann ist Geograf und arbeitet in Bonn.



## BIOMEDIZIN WAS UNS LÄNGER LEBEN LÄSST

**Auf den Osterinseln oder in Zombiezellen verbergen sich die Geheimnisse eines gesunden und langen Lebens. Der Autor schildert äußerst amüsant, was davon hilft.**

► Auf der Glatze wachsen Haare, graue Haare werden wieder braun, der Muskelumfang nimmt zu: Neun Männer sollen begeistert gewesen sein. Sie wurden jünger, ihre biologische Uhr hatte sich zurückgedreht. An einem exklusiven Kreis hatte der Biomediziner Greg Fahy vor drei Jahren ein Aufsehen erregendes Experiment durchgeführt. Um das Altern aufzuhalten, hatte er an neun Probanden einen Medikamenten-Mix aus Wachstumshormonen für die Thymusdrüse verteilt.

Danach kehrte allerdings Stille um diese anscheinende Revolution eines Anti-Aging-Wundermittels ein. Der Molekularbiologe Nicklas Brendborg handelt das Mittel in seinem Buch

»Quallen altern rückwärts« nur kurz ab, gibt es doch so viele andere Möglichkeiten für ein langes Leben. Und die stecken nicht nur in männlichen Thymusdrüsen, sondern auch in der Erde der Osterinseln, der Vermehrung von Quallen, im Händewaschen und in vielen weiteren Stoffen und Maßnahmen.

Selbst wenn der Titel des Buchs anderes vermuten lässt, geht es nur kurz um die Glibberwesen im Meer. Eine Art zeichnet sich aber besonders aus, wie der Autor erklärt: Die kleine Qualle *Turritopsis*, gerade so groß wie ein Fingernagel, ist quasi unsterblich. Bei Gefahr oder Hunger verwandelt sie sich in ihr Polypenstadium zurück und beginnt ihr Leben noch einmal von vorn. Und das beliebig oft. Am Anfang des Buchs stellt Brendborg dieses und weitere Beispiele von Tieren und Pflanzen vor, die ein langes und gesundes Leben führen können.

Doch nicht nur Tiere scheinen ein Geheimnis gegen das Altern zu hüten, einige Wundermittel stecken wohl auch in der Erde. Etwa auf einer der Osterinseln: Dort entstand im Boden ein Bakterium, das auf lebensverlängernde Weise das Wachstum von Zellen beeinflusst. Bevor man aber »die Gelegenheit beim Schopf packt« und das darauf beruhende Medikament Rapamycin einnimmt, sei gewarnt, dass noch nicht alle seine Nebenwirkungen bekannt sind.

Der Autor schreibt von der weltweit betriebenen Forschung, die zum Ziel hat, Menschen ein langes sowie gesundes Leben zu ermöglichen. Dazu gehört die Bekämpfung von Infektionen, Alzheimer, die Untersuchung der Thymusdrüse sowie die Auswirkungen von Schokolade. Ob Genetik, Krebszellen oder Plaques im Gehirn, der Autor stellt die Grundlagen einfach, verständlich und sachlich korrekt vor. Und er grenzt sich vom Anti-Aging-Hokuspokus ab, an den Menschen schon immer gern glaubten. Selbst heute ist der Bereich eine boomende Wirtschaftsbranche.

Auch die Wissenschaft verspreche manches Mal zu viel, kritisiert der Autor. Einiges klinge zwar viel versprechend, funktioniere aber eben doch

## Brendborg liefert die besten Ratschläge für ein langes und gesundes Leben

nur im Tierversuch. In anderen Fällen ist die Versuchsgruppe zu klein, oder man müsse so viel Obst und Gemüse »wie ein Elefant« zu sich nehmen, um einen messbaren Effekt zu erzielen. Damit relativiert Brendborg so einige vermeintliche Revolutionen.

Er schreibt allerdings nicht nur von Forschung, die künftig klappen könnten, sondern erklärt auch, wie man jetzt schon von der Wissenschaft profitieren kann. So haben Fasten, Hungern, Sport oder Blutspenden nur in bestimmten Situationen den angestreb-

ten Effekt. Für Spaziergänge gibt es beispielsweise eine optimale Zeit, und Low-Carb funktioniere nicht für jeden. Dabei führt er immer an, was fachlich erwiesen ist, was eher zu »Hokuspokus« zählt – und warum wir so gerne an Schokoladenstudien glauben wollen. Er gibt, wie im Vorwort versprochen, »die besten Ratschläge für ein langes und gesundes Leben an die Hand. Und eine gute Portion Skepsis.«

Das Buch ist nicht nur faktenreich und informativ, sondern auch erfrischend amüsant geschrieben. Brendborg nimmt die Leserinnen und Leser genau an den fachlichen Stellen mit, an denen man sonst vielleicht aufgeben hätte. Bevor es also mit »seneszenten Zellen« zu kompliziert wird, benennt er sie schnell in Zombiezellen um. Oder er übersetzt einen Stoff namens Fisetin aus dem Dänischen mit »Furzetin« und merkt an, dass ein Anti-Aging-Mittel mit diesem Produktnamen wohl nicht so gut ankommen würde.

Herausgekommen ist ein grandioses und lehrreiches Buch, das viel Spaß beim Lesen macht und bei dem der ein oder andere auch mal laut auflachen wird. Ebenso verdient die Arbeit des Übersetzers Justus Carl und die Förderung des Deutschen Übersetzerfonds ein Lob. Das Werk ist wohlthuend lesbar und authentisch aus dem Dänischen übersetzt.

Zum Schluss schreibt Brendborg: »Alle werden alt, unabhängig von ihrer ethnischen Zugehörigkeit, ihrer Nationalität, ihrem Geschlecht, ihrem Einkommensniveau oder ihrer Bildung. Wir sitzen alle im selben Boot. handelt ...« Der Wunsch nach einem langen Leben ist ein Menschenrecht und nicht mit Kriegszeiten vereinbar. Frieden ist somit das allerbeste Mittel für ein langes und auch glücklicheres Leben – auf der ganzen Welt und für alle Menschen.

Katja Maria Engel ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

## Spektrum der Wissenschaft

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

**Redaktionsleitung:** Dr. Hartwig Hanser

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

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

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

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

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

**Redaktionsassistent:** Andrea Roth

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

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle

**Assistenz Geschäftsleitung:** Stefanie Lacher

**Herstellung:** Natalie Schäfer

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

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

**Übersetzungen:** An diesem Heft wirkte mit: Dr. Ingrid Horn

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

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

**Bezugspreise:** Einzelheft € 9,30 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 98,40; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 75,-; PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

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

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

Ein Teil der Auflage beinhaltet das Magazin »Science Notes«.

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

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

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

**Gesamtherstellung:** L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2022 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

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

ISSN 0170-2971

**SCIENTIFIC AMERICAN**

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562  
Editor in Chief: Laura Helmut  
Executive Vice President: Michael Florek  
President: Kimberly Lau



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



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

## SOLARKRAFTWERK FÜR DEN HAUSGEBRAUCH

# 1922

»Dr. Abbot, ein Amerikaner, hat mit Hilfe [einer] von ihm erbauten Maschine einen ganzen Sommer lang alles kochen und wärmen können. Vier Stunden Sonnenschein am Tage genügen. Die Maschine hat einen Parabolspiegel, der die Sonnenstrahlen konzentrisch auffängt. Der Spiegel [wird] automatisch stets der Sonne zugekehrt. Hinter der Spiegeleinrichtung befindet sich ein Behälter, gefüllt mit schwer erhitzbarem Öl, das die Wärme vom Spiegel erhält und dadurch zum Sieden kommt. In diesem Zustande wird es den Kochstellen des Hauses durch Leitungen zugeführt.« *Technische Monatshefte 6, S. 119*

## EINE DEHNBARE EISENBAHNSCHRANKE

»Nach statistischen Ermittlungen wurden in den Vereinigten Staaten im letzten Jahre mehr als 1500 Personen durch Unfälle an Kreuzungen von Bahn und Straße getötet. Die dreifache Anzahl wurde schwer verwundet. Zum großen Teil handelt es sich dabei um Unfälle von Kraftwagen, die infolge tollkühnen Fahrens die Schranken durchbrachen. Nun hat Chicago Schranken aus Drahtseil-Flechtwerk angebracht. Dieses fängt den Stoß des anprallenden Wagens auf [und] ist so fest, daß es einen Wagen anhält, ohne zu zerreißen.« *Die Umschau 24, S. 380*



## HOLZ MIT KÄLTE TROCKNEN

»Während es bisher üblich war, Holz mit Wärme zu trocknen, geht man jetzt zu einem gegenteiligen Verfahren über. Das Holz wird in einen Raum gebracht, welcher durch eine Kälteanlage auf eine niedrige Temperatur gebracht wird. Die Feuchtigkeit der Luft schlägt sich infolge der Kältewirkung an den Kühlkörper nieder, so daß sie in Form von Eis an den Kühlkörpern ansetzt. Die Feuchtigkeit des Holzes aufzunehmen, welche sich dann wieder an den Kühlflächen niederschlägt. Bei diesem Verfahren erfolgt die Feuchtigkeitsentziehung nicht so schnell als bei der Trocknung in Wärme. Gerade dieses schnelle Trocknen bewirkt aber, daß das Holz sehr leicht reißt.« *Die Umschau 24, S. 382*

## SCHWARZE LÖCHER – ES GIBT SIE!

# 1972

»[Bei einem] ›schwarzen Loch‹ handelt sich um einen Stern, der unter dem Druck der Gravitationskraft zusammengebrochen ist. ›Schwarze Löcher‹ wurden von der Theorie bisher gefordert, ein experimenteller Beweis konnte erst jetzt erbracht werden. S. W. Hawking und G. W. Gibbons von der Universität Cambridge fanden das erste ›schwarze Loch‹ im Doppelstern Epsilon Aurigae. [Dort] wird der Primärstern mit 35 Sonnenmassen alle 27 Jahre von einem Körper bedeckt, der 23 Sonnenmassen aufweist und kein sichtbares Licht aussendet. Bei der Verfinsterung wird das Licht des Primärsterns abgeschwächt. [Offenbar handelt] es sich um ein ›schwarzes Loch‹.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 6, S. 234*

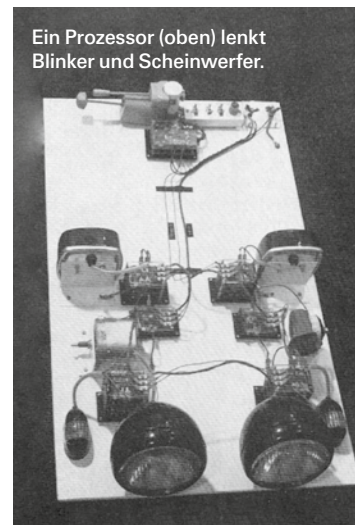
## DIE STÄDTE WERDEN SICH AUFHEIZEN

»[Man] weiß heute schon mehr über die Auswirkungen des zunehmenden Energieverbrauchs auf das Klima in Großstädten. Die Urbanisierung hat zur Folge, daß Großstädte im Jahresdurchschnitt 1°C wärmer sind als ihre Umgebung. Die wärmere Stadtluft hat eine längere Vegetationsperiode zur Folge, weniger Frosttage und geringeren Schneefall. Die Erhöhung der Lufttemperatur wird verstärkt durch den höheren Staub- und CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft. [Es] erhebt sich die Frage, inwieweit in Zukunft in Ballungsräumen eine Raumheizung noch notwendig ist.« *Die Umschau 11, S. 368*

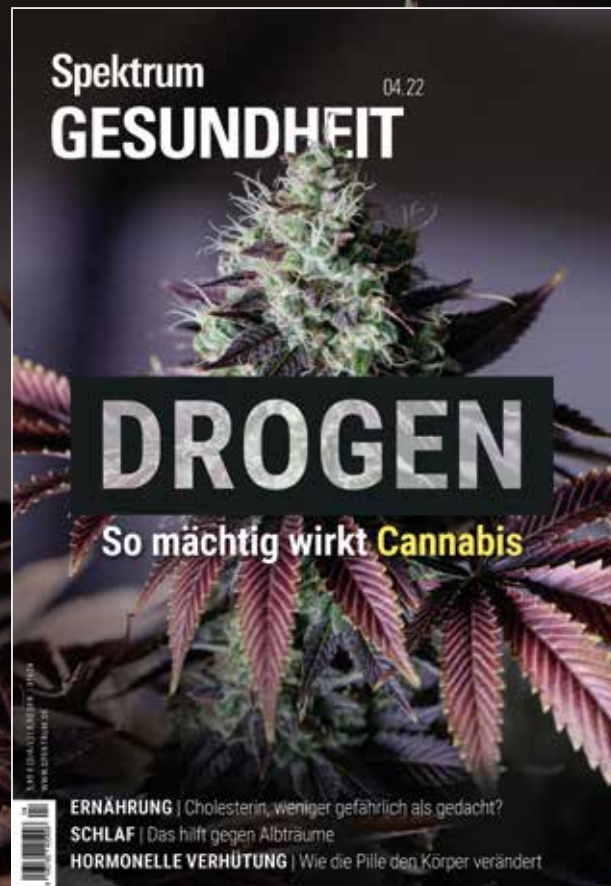
## DAS AUTO DIGITAL STEuern

»Aus dem Applikationslabor der RCA Corporation stammt der Versuchsaufbau einer digitalen Steuerschaltung für Automobile. Im heutigen Automobil [werden] allzu große Kabellängen verlegt, um alle Signaleinrichtungen (Scheinwerfer, Blinker, Hupe usw.) vom Armaturenbrett aus [zu] schalten. Da selbst komplizierte Digitalisierungen heute zu winzigen Schaltungen zusammen-schrumpfen können, kam der Entwickler auf den Gedanken, die Energie im Fahrzeug durch eine einzige Ringleitung an alle Stellen heranzuführen. Ein ›Prozessor‹ setzt die erhaltenen Befehle in einen Binärcode um.« *Elektronik 6, S. 220*

Ein Prozessor (oben) lenkt Blinker und Scheinwerfer.



Jetzt **Spektrum GESUNDHEIT** abonnieren  
und keine Ausgabe mehr verpassen!



## Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination:  
6 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder  
als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem  
von den exklusiven Vorteilen und Angeboten  
von **Spektrum PLUS** – wie kostenlosen Downloads,  
Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.



Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

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

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

## Human Refreshing

**Endlich mehr Zeit für sich haben!**

Eine Kurzgeschichte von Nicole Rensmann

**M**it Human Refreshing brauchen Sie keinen Schlaf mehr. In nur fünf Minuten sind Sie wieder topfit und haben genug Zeit für Ihren Job, Ihre Kinder und Ihr Hobby. Tag für Tag. Probieren Sie es jetzt aus und genießen Sie Ihr Leben – dauerhaft!«

Zum vierten Mal hörte Sally heute die Werbung und dachte darüber nach, dass kein Schlaf eine großartige Alternative zu ihrem aktuellen Leben wäre. Erst vor drei Wochen war sie befördert worden und arbeitete nun zwölf Stunden am Tag in einer Berliner Anwaltskanzlei. Außerdem war sie Mutter von zwei Kindergartenkindern. Sally liebte ihren Mann, der ihr aber nicht das geben konnte, was sie manchmal brauchte. Einmal in der Woche traf sie sich daher mit ihrem Geliebten. Sie schlief nur vier Stunden täglich, was kaum ausreichte, um am nächsten Tag aktiv und dynamisch zu sein. Der steigende Koffeinkonsum ließ ihre Pickel im Gesicht sprießen, gab ihr jedoch nicht das Gefühl, wacher zu sein. Fünf Minuten Refreshing hörte sich nach einer Investition an, die ihrem Leben mehr Ruhe bieten könnte. Mehr Zeit für die Kinder, für die Familie, für sich. Sie würde wahnsinnig gern mal wieder ein Buch lesen oder eine Stunde in der Wanne liegen, ohne dass die Kinder quengelten oder das Büro anrief. Wie viel mehr Freiraum sie hätte, wenn sie keinen Schlaf mehr benötigte!

Der Weg zu ihrem jetzigen Klienten war nicht weit, so dass sie mit dem Rad fahren und sich dabei sportlich betätigen konnte. Nun wartete sie an einer Bahnschranke und starrte auf die Reklamewand, auf der in wechselnden Leuchtbildern der beste Kaffee aller Zeiten, gefolgt von der saubersten Wäsche beworben wurde. »Human Refreshing« kam nach den veganen Gummibärchen mit natürlichem Himbeergeschmack. Das Werbebild bestand nur aus Text mit ein paar simplen Grafiken, die Hobbys symbolisierten.

Sally fuhr sich mit den Fingerspitzen über ihre spürbaren Augenringe. Sie zog ihr Smartphone aus der Handtasche und fotografierte den QR-Code ab. Eine Webseite öffnete sich.

Es präsentierte sich ein gut gebauter junger Mann mit nacktem Oberkörper, die Oberarme L-förmig angespannt. Sally zog die linke Augenbraue hoch.

Auf dem Bizeps des linken Arms saßen eine Frau und drei Kinder nebeneinander, rechts balancierte der Mann einen Aktenkoffer, einen Stapel Bücher sowie eine Hantel. Darunter stand der Spruch: »Seit ich Human Refreshing verwende, habe ich endlich Zeit für alles, was ich liebe.«

»Irgendwie sexistisch«, murmelte Sally vor sich hin. Sie tippte den Telefonhörer auf der Webseite an, die Verbindung wurde automatisch aufgebaut.

Eine Frauenstimme meldete sich: »Guten Tag, Human Refreshing Enterprises, Sie sprechen mit Frau Zolonki. Wie kann ich Ihnen helfen?«

Sally stellte sich kurz vor und fragte: »Gibt es Ihr Angebot auch für Frauen?«

Frau Zolonki schnaufte. »Sie sind über die Webseite gekommen, nicht wahr? Human Refreshing ist speziell für Frauen. Benötigen Sie einen Termin?«

»Gern, aber mir fehlt die Zeit.«

»Dann sind Sie bei uns genau richtig. Fünf Minuten zwischen Schule, Kindergarten und der Bürobesprechung. Kommen Sie einfach vorbei. Mehr ist nicht nötig.«

»Okay. Ich versuch's.«

Sally beendete das Gespräch. Sie hatte noch sieben Minuten bis zu ihrem Termin; pünktlich um elf erreichte sie das Haus des Klienten. Sie brauchte exakt 58 Minuten, um ihn von ihrer Strategie zu überzeugen. Um halb eins war sie mit ihrem Chef zum Mittagessen verabredet, vorher musste sie mit der Kindergärtnerin ihrer Jüngsten sprechen: Elli hatte angeblich ein anderes Kind geschlagen. Ein Thema, bei dem sich Micky, ihr Mann, gern heraushielt. Danach musste sie den Fensterputzer bestellen und mit einer neuen Klientin telefonieren, die sie am Nachmittag aufsuchen wollte. Sie kettete ihr Fahrrad an einem Laternenmast fest und leistete sich ein Taxi. Während der Fahrt zum nächsten Termin telefonierte sie ihre Liste ab.

Noch neun Minuten bis zum Mittagessen. Das Gebäude der Human Refreshing Enterprises lag drei Straßen weiter. Das könnte sie schaffen. Sie nannte dem Taxifahrer die neue Adresse, bat ihn, auf sie zu warten, und betrat das Gebäude.

**S**ie kam acht Minuten zu spät ins Restaurant. »Sally, Sie sehen hervorragend aus!« Ihr Chef winkte sie zu sich und bat sie Platz zu nehmen.

Und Sally fühlte sich fantastisch. Die Behandlung hatte nur fünf Minuten gedauert, die Anmeldung drei. Den Onlinefragebogen könnte sie später in aller Ruhe ausfüllen – Zeit hätte sie ja nun mehr als genug, hatte der behandelnde Arzt gesagt. Oder war es gar kein Arzt? Unwichtig! Sie war glücklich und freute sich schon darauf, in zwölf Stunden erneut aufgefrischt zu werden.

Die Prozedur lief jedes Mal in einer engen Kabine ab, in der Sally still stehen musste. Dabei war sie völlig nackt und trug lediglich eine Schutzbrille; zwei Dioden saßen an den Schläfen und je eine an den Handgelenken. Der gesamte Körper kribbelte innen wie außen, jede Pore schien sich zu erweitern und mit einem leisen Seufzer ein- und stumm



wieder auszuatmen. Es war ein befremdliches, leicht unangenehmes Gefühl, 300 Sekunden lang. Dann spürte Sally eine immense Energie, wie noch nie zuvor in ihrem Leben.

Human Refreshing wirkte wie eine Zauberdroge ohne Konsummittel. Sie hatte nur einen Nachteil: den Preis.

Micky verschwieg sie die Behandlung, das sollte ihr Geheimnis bleiben. Während er und die Kinder schliefen, genoss Sally die Zeit, die sie für sich hatte. Sie verschlang einen 500-seitigen Roman in einer Nacht, bingte sich durch Serien, die sie immer schon mal sehen wollte, badete, bis die Haut schrumpelte. Bei all ihren Aktivitäten, egal ob Entspannung, Telefonieren oder während einer Verhandlung, aß sie. Sally entwickelte einen kaum stillbaren Hunger, doch sie nahm nicht zu.

Ihre Sekretärin äußerte nach einigen Wochen die Vermutung, Sally sei schwanger.

»Ich arbeite viel, habe einen genialen Stoffwechsel. Das ist mein Geheimnis«, erklärte sie lächelnd und steckte sich ein Stück Schokolade in den Mund. Danach war sie süchtig. Und nach Human Refreshing. Sie hatte eine unbändige Lust auf Sex, traf sich nun jeden zweiten Tag mit ihrem Liebhaber und schlief an den Wochenenden mit ihrem Mann. Reichte das nicht, besorgte sie es sich auch schon mal selbst. Überhaupt war sie nicht mehr auf irgendwen angewiesen. Sie putzte die Fenster, wenn andere schliefen, kochte vor, während sie Akten studierte, und saugte den Teppich bei einer sportlichen Einlage. Und bei all dem arbeitete sie noch mehr. Jede Verhandlung, jeder neue Fall gab ihr einen Adrenalinstoß. Sie hatte seit vier Monaten nicht mehr geschlafen und fühlte sich übernatürlich stark, gewappnet für alles, was ihr in diesem Leben gegenüber treten mochte.

Einige Wochen darauf entwickelte sich der Fall einer reichen Mandantin, die einem Heiratsschwindler aufgesessen war, überraschend in eine ganz andere Richtung, und mit einem Mal sah sich Sally nicht mehr als Anwältin eines Opfers, sondern einer Täterin. Das verdarb ihr die gesamte Strategie, und die Verhandlung zog sich unerwartet in die Länge. Ihr Human-Refreshing-Termin war schon eine viertel Stunde überfällig. Das erste Mal, seit sie sich dieser Prozedur unterzog, würde sie zu spät kommen. Das ärgerte sie, und sie spürte eine immense Wut in sich aufsteigen. Die Finger ihrer rechten Hand trommelten auf dem Pult im Gerichtssaal.

Den Blick des Richters übersah sie. »Frau Printel, könnten Sie bitte das Geräusch lassen.«

Sally faltete ihre Hände und lächelte den Richter an. Ihr Gesicht wirkte maskenartig. Das angenehme Gefühl der

Dauerentspannung und Zufriedenheit fiel mehr und mehr von ihr ab. Sie entdeckte auf ihrem Handrücken einen blauen Fleck. Nach einer halben Stunde – der Richter hatte eine kurze Pause von zehn Minuten angeordnet, in der sich die Toiletten im Gerichtsgebäude zum meistfrequentierten Ort entwickelten – fand Sally zwei weitere Flecke an ihrem Hals, links und rechts, als sei sie gewürgt worden.

Erst drei Stunden später war die Verhandlung vorerst beendet. Auf dem Weg zum Human-Refreshing-Gebäude stellte Sally fest, dass ihre Arme überall mit blauen Flecken übersät waren. Ihr war schlecht, und eine nie gekannte Müdigkeit zwang sie dazu, sich auf einer Bank auszuruhen. Als sich ein Kind mit einem Eis in der Hand neben sie setzen wollte, keifte sie es an: »Verschwinde! Das ist meine Bank!«

Sie verspürte eine tiefe Erschöpfung und wusste nicht, ob sie den Weg schaffen würde, obwohl sie nur noch um eine Ecke biegen musste. Ihre Beine fühlten sich an wie Gummi, die Augenlider waren schwer wie Blei. Sie tippte auf die eingespeicherte Nummer von Human Refreshing.

»Hilfe! Ich kann nicht mehr.«

»Sally? Sind Sie es? Sie haben Ihren Termin verpasst. Das ist schlecht. Ich schicke jemanden zu Ihrem Standort, schalten Sie das Handy nicht aus!«

»Was passiert mit mir?« Ihre Stimme klang wie die einer alten Frau.

»Haben Sie die AGB nicht gelesen? Darin steht, dass unerwünschte Nebenwirkungen auftauchen können, wenn Sie die Termine nicht regelmäßig wahrnehmen, Sie die Behandlungen nicht mehr bezahlen, einen Termin vergessen oder aus Krankheitsgründen fehlen. Sie haben unterschrieben, dass Sie uns von jeglicher Gewährleistung freisprechen. Aber keine Sorge. Hilfe ist gleich da.«

Nach fünf Minuten Human Refreshing war Sally wieder wie neu, bis auf einen kleinen blauen Fleck auf der linken Wange, der ihr ein Leben lang erhalten bleiben würde. Ein Leben lang mit Human Refreshing. ◀

#### DIE AUTORIN

**Nicole Rensmann** lebt in Remscheid und arbeitete als kaufmännische Angestellte, bevor sie ein Versandgeschäft für fantastische Literatur führte. 1998 veröffentlichte sie ihre erste Kurzgeschichte und hat seitdem mehr als 80 Erzählungen für Erwachsene und Kinder verfasst. 2004 erreichte sie den 2. Platz beim Deutschen Science-Fiction-Preis.

# VORSCHAU



QUADRIE / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## ERSTE SCHRITTE ZUM QUANTENINTERNET

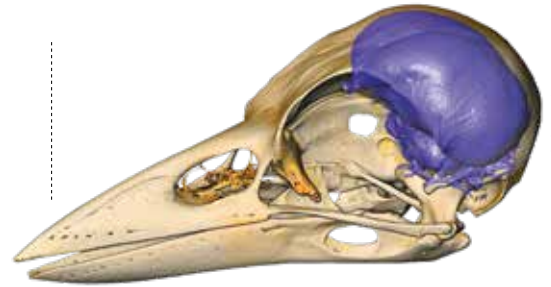
Die Gesetze der Quantenmechanik lassen seltsamste Vorgänge zu – etwa, dass sich zwei weit entfernte Objekte unmittelbar beeinflussen. Dieses Prinzip wird zwar seit Jahrzehnten erforscht, doch ein kompliziertes Netzwerk wie das Quanteninternet bringt womöglich unerwartete Phänomene hervor.



ALMA (ESO/NAO/JINRAO/ALEXANDRA ANGELICH) / NRAO/AUI/NSF (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/IMAGES/ESO/PHOTO1 / CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE))

## WARTEN AUF DAS GALAKTISCHE FEUERWERK

Jederzeit könnte irgendwo in der Milchstraße ein Stern explodieren. Deswegen laufen überall auf der Welt Vorbereitungen: Optimierte Instrumente und Pläne für den Fall der Fälle sollen die ersten Augenblicke des Spektakels möglichst umfassend dokumentieren.



WIKIMEDIA COMMONS; UNIVERSITÄT; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## DIE EVOLUTION DES VOGELHIRNS

Bei einigen Vögeln ist das Gehirn im Vergleich zur Körpergröße ähnlich stark gewachsen wie bei den Säugetieren einschließlich der Primaten. Wie kam es dazu – und warum nur in manchen Entwicklungslinien?



WANG XI / XINHUA NEWS AGENCY / PICTURE ALLIANCE

## DIE MYSTERIÖSEN GRUBEN VON SANXINGDU

Vor rund 3200 Jahren legten Menschen in China massenhaft Kunstwerke in Gruben. Wozu die vielen Objekte einst dienten und weshalb sie in die Erde gelangten, stellt Archäologen vor Rätsel.

## NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:  
[spektrum.de/newsletter](https://www.spektrum.de/newsletter)

Jetzt **Spektrum** der Wissenschaft abonnieren  
und keine Ausgabe mehr verpassen!



## Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination:  
12 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder  
als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem  
von den exklusiven Vorteilen und Angeboten  
von **Spektrum** PLUS – wie kostenlosen Downloads,  
Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.



### Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

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

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

# DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



**Spektrum**  
der Wissenschaft  
**DIE WOCHE**

NR **15** 14.04.2022

- > Manche Mutationen schützen wohl vor Covid-19
- > Zauberpilze knüpfen neue Hirnnetzwerke
- > Jahreszeiten auf dem Neptun

TITELTHEMA: JAMES-WEBB-WELTRAUMTELESKOP

## Hat die NASA Beweise gegen James Webb zurückgehalten?

Das größte Weltraumteleskop soll anders heißen, fordern manche. Der Vorwurf: James Webb war homophob. Nun öffentliche E-Mails zeigen, dass die NASA über seine damaligen Handlungen mehr weiß als behauptet.

**WISSENSCHAFTSFREIHEIT**  
Forscher am Pranger

**VERNACHLÄSSIGTE TROPENKRANKHEITEN**  
Kampf um mehr Aufmerksamkeit

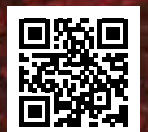
**BESIEDLUNG DER WELT**  
Wie das Klima die Evolution des Menschen prägte

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im monatlich kündbaren Abonnement € 0,92 je Ausgabe; ermäßigt sogar nur € 0,69.

**Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!**

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



UNSPLASH / PAWEŁ CZERWINSKI (UNSPLASH.COM/PHOTOS/6LD0F60B11W), BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT