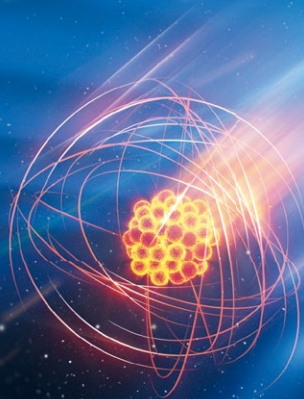


# Spektrum

der Wissenschaft

## Kosmische Atomschmiede

Wie kollidierende  
Sterne die schwersten  
Elemente formen



TRANSPLANTATE **Schweine als Organspender**  
ALTES ÄGYPTEN **Warum Paviane heilig waren**  
OZEANE **Das Geheimnis des Meeresleuchtens**

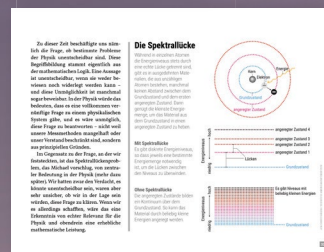
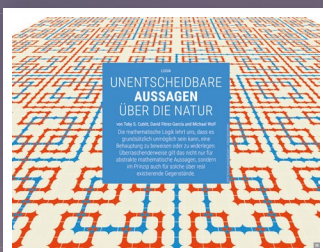
9,80 € (D/A/L) · 14,- sFr. D6179E  
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



# 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 400 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)

# Programmierte Plaudertasche

Ende November 2022 veröffentlichte das US-amerikanische Unternehmen OpenAI eine neue Software mit bisher unerreichten Fähigkeiten im Verständnis und in der Produktion menschlicher Sprache. Man kann dieser »ChatGPT« genannten künstlichen Intelligenz alle möglichen Fragen und sprachliche Aufgaben stellen: Egal, ob es ein fiktives Interview mit einem berühmten Komponisten erstellen oder einen Essay zu den Folgen seiner eigenen Existenz verfassen soll, es ist selten um Worte verlegen. Zwar merkt man beim kritischen Gegenlesen doch schnell Begrenzungen, sowohl in der mangelnden Korrektheit vieler Fakten als auch im etwas repetitiven, klare Stellungnahmen vermeidenden Stil, der oft eher an ein Schülerreferat erinnert. Dennoch kommt das Ergebnis dem Bestehen des berühmten Turingtests insofern sehr nahe, als man die Texte durchaus als von einem Menschen geschaffen akzeptieren kann. Meine Kollegin Manon

Bischoff beschreibt ab S. 58, wie die Entwicklung dieses »Generative Pre-trained Transformer« – so der unhandliche Name, der hinter der Abkürzung GPT steckt – ablief, und erläutert detailliert die Hintergründe der Funktionsweise solcher KI-Programme.

Manche sehen in der Entwicklung derartiger künstlicher Intelligenzen schon eine akute Gefahr für die Existenz der Menschheit. Allerdings darf man nicht vergessen, dass der eindrucksvolle Auftritt von ChatGPT das Ergebnis eines extrem aufwändigen Trainings ist, für das Hochleistungsrechner mehrere Wochen lang schufteten mussten. Solange das nötig ist, sehe ich wenig Gefahr. Bedrohlicher erscheint mir dann doch derzeit der Klimawandel mit all seinen komplexen Auswirkungen. Politik und Wissenschaft sind hier gemeinsam gefordert und auch bereits daran, Gegenmaßnahmen auszuarbeiten. Welches die richtigen sind, ist allerdings oft noch umstritten. So beabsichtigt der neue Klimaschutzplan »Fit for 55« der EU, der die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 Prozent senken will, unter anderem die Nutzung von Bioenergie stark zu fördern. Ab S. 50 kritisiert ein internationales Wissenschaftlerteam, die darin vorgesehene Wertung von Biomasse als »kohlenstoffneutral« führe zum Verbrauch wertvoller Flächen, die sowohl zur natürlichen Kohlenstoffspeicherung als auch für die Nahrungsmittelproduktion dringend benötigt würden. Europa müsse den Kohlenstoffverlust in Landökosystemen verringern, den die Land- und Forstwirtschaft verursacht. Mit der Förderung der Bioenergie steigt die Gefahr, dass dieser Kohlenstoff-Fußabdruck einfach in andere Weltregionen ausgelagert wird.



Hartwig Hanser

Redaktionsleiter

[hanser@spektrum.de](mailto:hanser@spektrum.de)

Zum Schluss noch ein Hinweis in eigener Sache: Leider macht die Inflation auch vor unserem Verlag nicht Halt. Die deutlich gestiegenen Kosten für Energie, Druck und Transport führen bei »Spektrum der Wissenschaft« ab dieser Ausgabe zu einer Preiserhöhung im Einzelverkauf auf 9,80 € und im Abo um 60 Cent pro Ausgabe. Die Digitalabos bleiben unverändert. Bei Vorauszahlungen gelten die neuen Abo-Preise ab der nächsten Rechnung.

Ich möchte Sie bei dieser Gelegenheit auch noch einmal auf »Spektrum Plus« ([spektrum.de/plus](http://spektrum.de/plus)) hinweisen: unsere Internetseite mit zahlreichen Vorteilen, Zusatzangeboten und Vergünstigungen exklusiv für Abonnentinnen und Abonnenten. Sie finden dort unter anderem jeden Monat einen kostenfreien Download eines weiteren Produkts von »Spektrum« oder kostenfreie sowie kostenvergünstigte Veranstaltungen.

Ihr

## In dieser Ausgabe

### Sanjana Curtis

Die Astrophysikerin modelliert die Produktion schwerer Atomkerne bei energiereichen Vorgängen rund um Neutronensterne (S. 12).



### Nathaniel J. Dominy

Was mumifizierte Paviane und das Verhalten lebender Exemplare über das legendäre Goldreich Punt verraten, erklärt der Primatologe ab S. 72.



- 3 EDITORIAL
- 6 SPEKTROGRAMM

## TITELTHEMA

### 12 **Kosmische Schmiede der schweren Elemente**

Die massereichsten Atome entstehen bei gewaltigen Ereignissen im Weltraum.  
Von Sanjana Curtis

## FORSCHUNG AKTUELL

- 22 **Bewegte Ladungen präzise verfolgt**  
Kombinierte Techniken bieten detaillierte Blicke auf die Vorgänge in Photokatalysatoren.
- 24 **Dürre brachte wohl das Hethiterreich zu Fall**  
Darauf deuten 3200 Jahre alte Holzfunde hin.
- 26 **Trio teilt Zahlen in zwei Lager**  
Wie viele natürliche Zahlen lassen sich als Summe zweier Kubikzahlen darstellen?
- 29 **Raupen statt Mäuse**  
Insektenlarven ermöglichen es, Tierversuche mit Nagern zu reduzieren.

## SPRINGER'S EINWÜRFE

- 33 **Krieg der Automaten**  
Unbemannte Flugkörper entscheiden moderne Schlachten – und bald auch über Leben und Tod?

## BIOLUMINESZENZ

- 34 **Geheimnisvolles Meeresleuchten**  
**SERIE: OZEANE (TEIL 3)** Die rätselhaften »Milchmeere« gehen vor allem auf Bakterien in den Ozeanen zurück, die Licht hervorbringen können.  
Von Michelle Nijhuis

## 43 IM BILD

## MEDIZIN

### 44 **Organspende aus dem Tierreich**

Chirurgen haben Herzen und Nieren von Schweinen in menschliche Empfänger verpflanzt. Eine neue Hoffnung für die Transplantationsmedizin?  
Von Sara Reardon

## ÖKOLOGIE

### 50 **Klimaschutz auf Kosten der Natur**

Der EU-Plan »Fit for 55« in der Kritik.  
Von Timothy Searchinger et al.

## FREISTETTERS FORMELWELT

- 57 **Wie man Primzahlen auf Linie bringt**  
Eine Kritzelei aus Langeweile enthüllt mysteriöse Geraden und Diagonalen aus Primzahlen.

## KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

- 58 **Was steckt hinter ChatGPT?**  
Damit Maschinen mit Sprache umgehen können, müssen sie eine besondere Fähigkeit unseres Gehirns nachahmen.  
Von Manon Bischoff

## SCHLICHTING!

- 70 **Befreiende Luftströme im Sand**  
Ein oben geschlossenes Rohr dringt leichter in Granulat ein als ein offenes.

## PRIMATEN

- 72 **Das Rätsel der heiligen Paviane**  
Warum die Primaten im alten Ägypten als heilig galten, verrät ihr besonderes Verhalten.  
Von Nathaniel J. Dominy

## 80 FUTUR III

## 81 IMPRESSUM

## 82 VORSCHAU

## Weitere Beiträge

Im PDF der Digitalausgabe sowie unter [spektrum.de/aktion/zusatzinhalte](https://spektrum.de/aktion/zusatzinhalte) finden Sie die folgenden zusätzlichen Artikel:

## PLANKTON

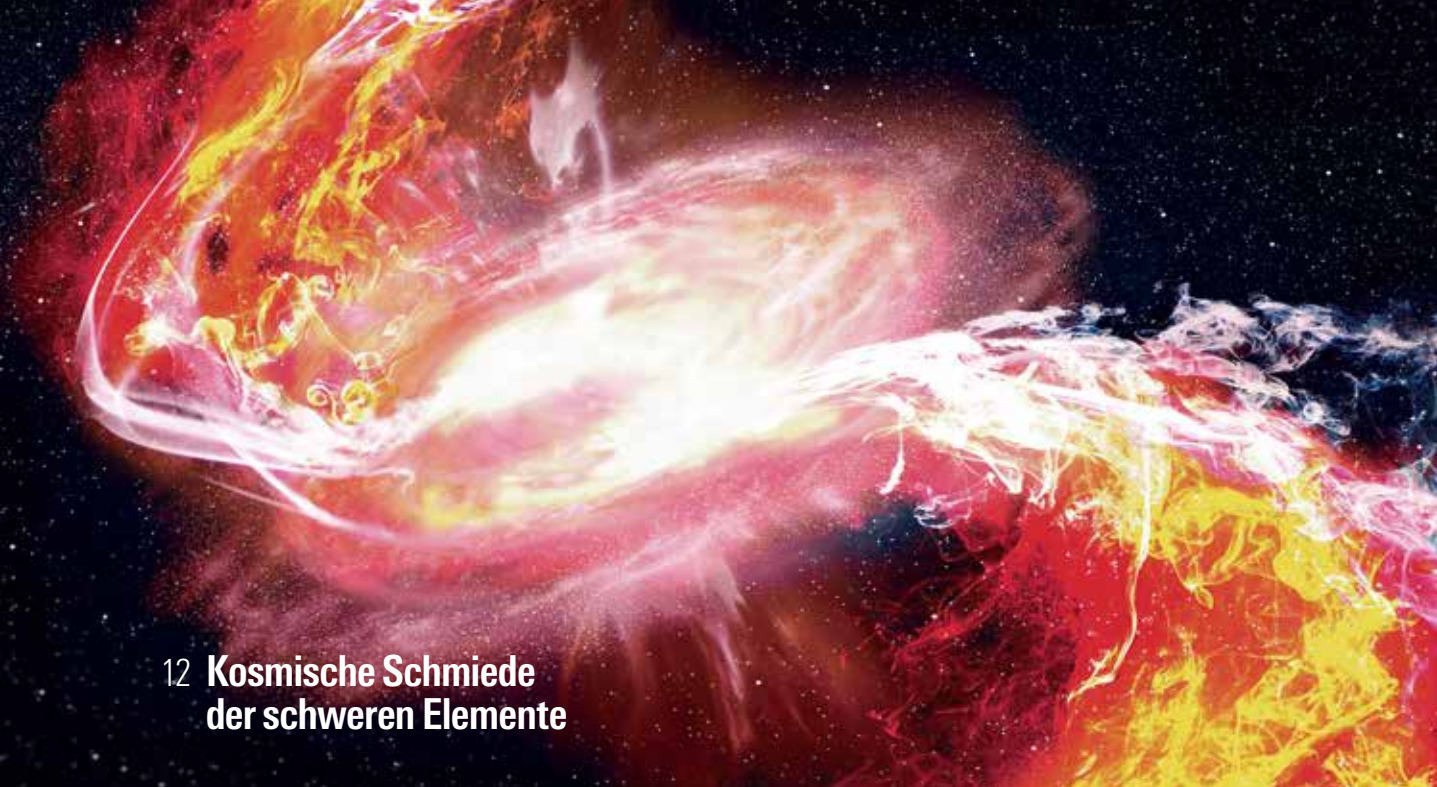
### **Verborgene Wanderungen**

## MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

### **Eine Frage der Gerechtigkeit**

## REZENSIONEN

TITELBILD:  
ES/OL\_CALÇADA/M\_KORNMESSER (WWW.ESD.ORG/PUBLIC/IMAGES/ES01917A/) /  
CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



RON MILLER / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2023

## 12 Kosmische Schmiede der schweren Elemente



K.C. ALFRED / ZUMAPRESS.COM / PICTURE ALLIANCE

## 34 Meeresleuchten



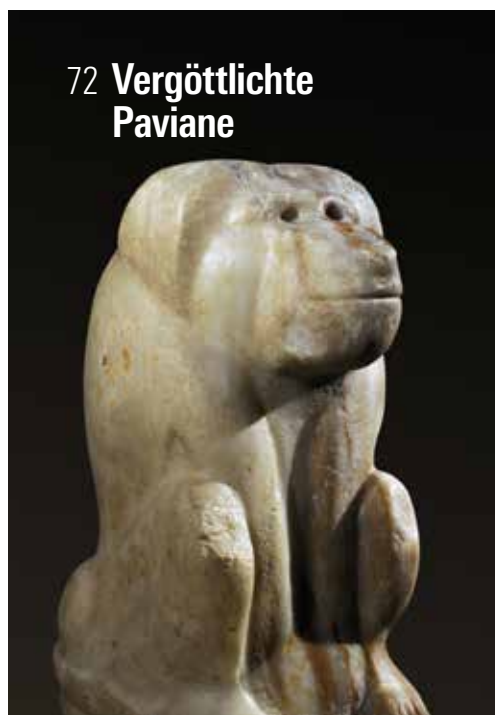
UNIVERSITY OF MARYLAND MEDICAL CENTER / UMMS

## 44 Organtransplantation



## 58 Was steckt hinter ChatGPT & Co?

MANION BISCOFF / ERSTELLT MIT DALL·E



## 72 Vergöttlichte Paviane

ALAMY / PRISMA ARCHIVO



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

Auf Spektrum.de berichtet unsere Redaktion täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.





## Runen auf Gold liefern frühesten Beleg für Odin-Glaube

Früher als bislang angenommen verehrten Nordeuropäer den Gott Odin. Das bezeugt ein Goldmedaillon des frühen 5. Jahrhunderts n. Chr. aus dem dänischen Vindelev. Das handtellergroße Schmuckstück zeigt den Kopf eines Mannes, ein Pferd, eine Swastika sowie einen Halbkreis; die letzten zwei symbolisieren vielleicht Sonne und Mond. Den Kopf deuten Fachleute als Abbild eines Herrschers. Um ihn herum läuft eine Runeninnschrift. Weil die Zeichen ohne Abstände eingestempelt und stellenweise abgerieben sind, lässt sich der Text schwer entziffern. Zudem ist die Schriftsprache sehr alt und viele ihrer Wörter sind noch unbekannt.

Am Beginn der Inschrift ist möglicherweise von Opfertieren die Rede, von einem Jäger und einer Person namens Jaga. Das Textende lautet aber recht sicher »Er ist Odins Mann«. Wahrscheinlich ist damit der abgebildete Herrscher gemeint, der sich durch seine Nähe zu Odin als König legitimiert haben könnte.

Die zuvor älteste bekannte Inschrift, die den Glauben an Odin oder Wodan – so sein südgermanischer Name – bezeugt, stammt aus dem bayerischen Nordendorf. Sie prangt auf einer Gewandspange aus der zweiten Hälfte des 6. Jahrhunderts n. Chr.

Mitteilung des Nationalmuseums Kopenhagen und der Universität Bergen auf [videnskab.dk](http://videnskab.dk), 08. März 2023



**ROTE EINÖDE**  
Die Atacama-  
Wüste ähnelt den  
Landschaften  
auf Mars.

ARMANDO AZUA-BUSTOS, CENTRO DE ASTROBIOLOGÍA (CAB), MADRID

## ASTROBIOLOGIE

### Mars-Sonden finden kein Leben auf der Erde

► Lebensspuren auf dem Mars aufzuspüren, ist einer der wichtigsten Gründe, Missionen dorthin zu schicken. Doch die bislang eingesetzten Mars-Sonden sind dafür anscheinend nicht empfindlich genug. Zu diesem Ergebnis kommt eine Arbeitsgruppe um Armando Azua-Bustos vom Centro de Astrobiología in Madrid.

Die Forscherinnen und Forscher haben Gesteine aus der chilenischen Atacama-Wüste mit empfindlichen Labormethoden untersucht und reichlich Lebensspuren darin nachgewiesen. Die gleichen Analysen führten sie mit irdischen Gegenständen jener Instrumente durch, die auf dem Marsrover »Curiosity« oder dem geplanten »ExoMars«-Rover installiert sind. Die Atacama-Wüste ist den Marslandschaften sehr ähnlich und deshalb ein gutes Testgelände für Raumfahrtmissionen. Sollen Weltraumsonden auf dem Roten Planeten Leben nachweisen, müssen sie das auch in der chilenischen Einöde schaffen.

Ein Chromatograf, der dem Instrument SAM auf »Curiosity« entspricht, wies in den Versuchen zwar organisches Material nach – doch er ist zehnmal empfindlicher als sein marsianisches Gegenstück, das

deswegen wohl erfolglos geblieben wäre. Das irdische Pendant zum MOMA-Instrument auf »ExoMars« versagte in den Tests. Mehr Erfolg hatten die Geräte mit Hilfe eines komplizierten Verfahrens, bei dem organische Stoffe vor der Analyse mit Lösungsmitteln angereichert werden. Hier entdeckten die Maschinen einige wenige Verbindungen. Das Problem: Diese Stoffe hat »Curiosity« auf dem Mars bereits nachgewiesen. Sie müssen nicht von Organismen, sondern könnten auch aus geologischer Aktivität stammen, aus dem Weltraum oder gar aus dem Lösungsmittel selbst. Von Bausteinen des Lebens sind sie weit entfernt.

Einen echten Hinweis auf Leben in den irdischen Proben lieferte nur das dritte getestete Experiment namens SOLID-LDChip, das auf einem abgewandelten biomedizinischen Verfahren basiert. Aber dieses wird vermutlich nie auf dem Mars zum Einsatz kommen. Zumindest bisher ist es für keine Mission vorgesehen.

Fachleute bewerten die Resultate als ernüchternd. Wenn die Instrumente nicht in der Lage seien, Biosignaturen in irdischen Proben aufzuspüren, könne man nicht erwarten, dass sie das auf dem Mars leisten, hieß es. Das Team um Azua-Bustos zieht ein klares Fazit: Um Leben auf dem Mars zu finden, müssten Proben vom Roten Planeten in irdischen Labors untersucht werden.

Nature Communications 10.1038/s41467-023-36172-1, 2023

## MEDIZIN

### Leber-Erneuerung durch Darmbakterien

► Die menschliche Leber kann sich umfassend regenerieren: Sogar wenn sie zur Hälfte entfernt wird, wächst sie oft binnen Wochen komplett nach. Das ermöglicht es, einen Teil des Organs an bedürftige Empfänger zu spenden. Ein Forschungsteam um Klaus-Peter Janssen vom TUM-Universitätsklinikum rechts der Isar hat jetzt in Tierversuchen gezeigt: Die Erneuerungsfähigkeit der Leber hängt stark vom Artenspektrum der Darmflora ab.

Das Mikrobiom im menschlichen Darm setzt sich aus diversen Bakterienarten zusammen. Sie wirken an der Verdauung mit; einige von ihnen zerlegen Kohlenhydrate in kurzkettige Fettsäuren. Leberzellen benötigen solche Fettsäuren, um wachsen und sich teilen zu können.

Janssen und sein Team verabreichten Labormäusen gezielt Antibiotika, um deren Darmflora zu stören. Daraufhin entstanden bei den Tieren praktisch keine neuen Leberzellen mehr – genauso wenig wie bei Nagern, denen das Mikrobiom von Geburt an fehlt. Zusammenhänge zwischen Antibiotikagebrauch und verminderter Leberregeneration waren schon vorher bekannt gewesen. Als eigentliche Ursache hatten Fachleute aber Immunreaktionen oder Arzneistoff-Nebenwirkungen direkt auf Leberzellen vermutet.

Laut der Forschungsgruppe töten Antibiotika unter anderem solche Darmmikroben, die kurzkettige Fettsäuren produzieren. Der Effekt sei umkehrbar: Einige Wochen nach dem Absetzen des Arzneistoffs regeneriere sich das Mikrobiom und später auch die Erneuerungsfähigkeit der Leber. Bei Mäusen ohne Mikroflora war überhaupt keine selbstständige Leberregeneration nachweisbar, ließ sich jedoch durch Übertragen von Darmmikroben herbeiführen.

Weitere Experimente mit Leber-Organoiden aus Mauszellen in der



Kulturschale belegten, dass kurzkettige Fettsäuren unersetzliche Bestandteile der Leberzellmembran sind. Fehlen sie, wachsen und vermehren sich die Zellen nicht. Laut Janssen und seinen Kollegen wäre es lohnenswert zu erforschen, welches Mikroflora-Artenspektrum gute Voraussetzungen für eine Selbsterneuerung der Leber bietet. Anhand der Darmbakterien eines Patienten ließe sich dann beispielsweise besser beurteilen, ob der Zeitpunkt für eine Transplantation günstig ist.

Journal of Hepatology 10.1016/j.jhep.2022.12.028, 2023

## BIOLOGIE

### Pumas schwimmen kilometerweit

Die Pumas in Nord- und Südamerika (*Puma concolor*) galten bislang als relativ wasserscheu. Das muss jetzt revidiert werden. Der Ökologe Mark Elbroch und seine Kollegen und Kolleginnen von der Naturschutzorganisation »Panthera« haben beobachtet, dass die Raubkatzen kilometerweit durch den kalten Pazifik schwimmen, um auf Inseln zu gelangen.

Elbroch & Co. hatten Daten dazu gesammelt, wie sich Pumas im Gebiet der Olympic-Halbinsel bewegen, die im Nordwesten des US-Bundesstaats Washington liegt. Dort gibt es ausgedehnte Naturschutzgebiete. Angrenzende Städte und das Meer

schiene Barrieren für die Raubkatzen zu sein.

Die Datenauswertung offenbarte jedoch Überraschendes: Im Juli 2020 schwamm das mit einem Sender ausgestattete Pumamännchen »Nolan« von der Ostküste der Halbinsel auf das 1,1 Kilometer entfernte Squaxin-Eiland. Es war der erste Nachweis, dass diese Raubkatzenart längere Strecken im Meer zurücklegt. Daraufhin prüften die Forscher systematisch, ob es auf den Inseln der Region bestätigte Hinweise auf Pumas gibt – und fanden sie auf vier weiteren Eilanden, von denen einige mehr als zwei Kilometer vor der Küste liegen.

Ihre Schwimmfähigkeiten erlauben es den Katzen somit theoretisch, mehr als 4500 Inseln zwischen dem Bundesstaat Washington und der kanadischen Provinz British Columbia zu erreichen, schließen Elbroch und sein Team. Wahrscheinlich wagen sich vor allem junge Männchen hinaus – auf der Suche nach Nahrung, freien Revieren und paarungsbereiten Weibchen.

Für »Nolan« endete die Reise tragisch: Zwei Wochen nachdem er auf Squaxin angekommen war, wurde er von einer unbekanntenen Person gewildert. Die an ihm gewonnenen Erkenntnisse sind dennoch von großem Nutzen, etwa wenn es darum geht, Wildtierkorridore oder -brücken anzulegen, über die Raubkatzen gefährliche Straßen oder Gleise passieren können. Ein solches Projekt soll beispielsweise Puma-Populationen nützen, die nahe

Los Angeles leben: Im Großraum der Metropole müssen sich die Katzen täglich mit dem intensiven Verkehr der Millionenstadt arrangieren.

Northwestern Naturalist 10.1898/1051-1733-103.3.236, 2022

## ASTRONOMIE

### Schwarzes Loch hinterlässt Sternenspur

Auf Bildern des Weltraumteleskops »Hubble« ist eine eigenartige Struktur zu sehen: ein auffällig gerader, schmaler Streifen junger Sterne weit außerhalb einer Galaxie. Die wahrscheinlichste Erklärung dafür sei ein entflohenes Schwarzes Loch, so eine Arbeitsgruppe um den Astronomen Pieter van Dokkum von der Yale University.

Im Zentrum fast jeder Galaxie befindet sich ein extrem massereiches Schwarzes Loch mit der milliarden- bis milliardenfachen Masse unserer Sonne. Fachleute vermuten schon seit Langem, dass diese Massemonster manchmal fortgeschleudert werden, wenn Galaxien miteinander kollidieren, und sich dann losgelöst durchs Universum bewegen. Direkte Beweise dafür gab es bisher nicht, weil sich isolierte Schwarze Löcher im Kosmos nur sehr schwer nachweisen lassen. Der Zufallsfund könnte nun einen solchen Beleg liefern.

Die Aufnahmen zeigen einen Streifen aus Sternen und Gas, der dem Zentrum einer kleinen irregulären Galaxie zu entspringen scheint. Beide sind ungefähr 5,4 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt. Die Form der Galaxie spricht dafür, dass sie erst vor Kurzem mit einer anderen Sterninsel verschmolzen ist.

Mit einer Länge von mehr als 200 000 Lichtjahren misst der Streifen von einem Ende zum anderen gut doppelt so viel wie unsere Milchstraße. An seiner Spitze, die von der irregulären Galaxie wegweist, ist er

SHAWN MULLER / GETTY IMAGES / STOCK



**FREISTIL** Pumas können sehr weit schwimmen.

heller und schmaler. Laut den Analysen haben seine Sterne ein Alter von nur wenigen Millionen Jahren.

Diese Beobachtungen sowie Modellrechnungen deuten auf ein extrem massereiches Schwarzes Loch hin, das vor 39 Millionen Jahren aus dem Zentrum der Galaxie geworfen wurde und jetzt mit 1600 Kilometer pro Sekunde durchs Universum rast. Auf seinem Weg trifft es offenbar immer wieder auf kosmische Gaswolken, verdichtet sie und regt die Entstehung neuer Sonnen an. Dementsprechend scheinen die Sterne an der Spitze des Streifens jünger zu sein als jene an seiner Basis.

Obwohl die Bilder das Schwarze Loch nicht direkt abbilden, sprechen die Indizien klar für seine Existenz. Neue hochauflösende Aufnahmen des James-Webb-Teleskops könnten mehr Details zeigen und vor allem die Region an der Spitze des Streifens besser darstellen. Untersuchungen der Röntgenstrahlung, die von dort kommt, erlauben es künftig vielleicht sogar, die so genannte Akkretionsscheibe – den heißen Materiestrudel rund um das Massemonster – direkt nachzuweisen.

arXiv 10.48550/arXiv.2302.04888, 2023

## PHYSIK

### Sechsecke in Salzwüsten

► In manchen Wüsten überziehen Salzsichten den Boden, so weit das Auge reicht. Sie bergen ein seit Jahrzehnten ungelöstes Rätsel, denn sie untergliedern sich oft in ein bis zwei Meter große Vielecke, getrennt durch schmale Salzgrate. Diese Muster sehen überall auf der Welt ähnlich aus, und niemand weiß, warum. Ein neues Modell, entwickelt von einer Forschungsgruppe um Jana Lasser von der TU Graz, liefert nun eine Erklärung dafür. Demnach bilden sich die Vielecke durch auf- und absteigendes Grundwasser im porösen Untergrund.

Das Phänomen beruht darauf, dass in der Wüstenhitze viel Feuchtigkeit aus dem Boden verdunstet. Dadurch steigt in oberflächennahen Wasserreservoirs die Salzkonzentration, was die Flüssigkeit dichter und schwerer macht. Weil sie über relativ leichtem und salzarmem Grundwasser liegt, wird die Schichtung instabil, und die Salzlösung beginnt an einigen Stellen abzusinken. Zum Ausgleich kommt woanders Wasser von unten hoch. Diese Auf- und Abbewegungen organisieren sich in typischen Mustern, so genannten Konvektionszellen.

In der Mitte jeder Konvektionszelle steigt salzarme Flüssigkeit empor und breitet sich dann seitlich aus. Da Feuchtigkeit aus ihr verdunstet, wird sie allmählich immer salzhaltiger und zieht das nachfließende Wasser per Osmose mit sich, was die seitliche Strömung stabilisiert. Irgendwann erreicht die Salzlösung den Rand der benachbarten Konvektionszelle, wo sie auf die von dort kommende Flüssigkeit trifft. Die Strömung stoppt; die aufkonzentrierte Lösung scheidet Kristalle ab und bringt so die Salzgrate hervor, bevor sie in die Tiefe sinkt.

Wie das Team anhand von Computermodellen herausfand, erzeugen diese Vorgänge regelmäßige Zellen mit rund einem Meter Durchmesser, was ungefähr der Größe der natürlich auftretenden Strukturen entspricht. Messungen im kalifornischen Owens Lake, einem ausgetrockneten See, bestätigten diverse Aussagen des Modells. So ist die Schichtung des Grundwassers unter den Salzstrukturen tatsächlich instabil und weist das theoretisch vorhergesagte Konzentrationsgefälle auf. Einige Fragen müssen

aber noch geklärt werden, schreiben die Forscherinnen und Forscher. So seien die Sechseckmuster in der Natur regelmäßiger, als es die Simulationen abbilden. Möglicherweise prägen weitere Effekte ihre Form.

Physical Review Letters  
10.1103/PhysRevX.13.011025, 2023

## ARCHÄOLOGIE

### Eine neue Kammer in der Cheopspyramide

► Ein internationales Forschungsteam hat in der Großen Pyramide von Giseh eine zuvor unbekannte Kammer entdeckt. Mit einem Endoskop konnten die Wissenschaftler einen Blick hineinwerfen. In dem Raum seien keine Fußspuren oder sonstigen Hinweise auf menschliche Aktivitäten zu erkennen, teilt das Team mit. Es sei anzunehmen, dass dort seit mehr als 4500 Jahren niemand mehr gewesen ist. Die Kammer befindet sich oberhalb des ursprünglichen Zugangs an der Nordseite der Pyramide – 17 bis 23 Meter über Bodenniveau. Sie ist gut zwei Meter breit und hoch sowie mindestens neun Meter lang.

Fachleute zeigen sich überrascht von der Größe des Hohlraums. Vermutlich hatte er aber nur eine technische Funktion. »Es sieht für mich sehr danach aus, dass es sich um eine weitere Entlastungskammer handelt, die den immensen Druck der Steine von der Eingangskonstruktion nehmen sollte«, sagt der Ägyptologe Alexander Schütze von der Ludwig-Maximilians-Universität München,



VIELECKIG  
Salzgrate in einem  
ausgetrockneten  
See Boliviens.

SARA\_WINTER / GETTY IMAGES / ISTOCK



**DIE NEU ENTDECKTE KAMMER** in der Cheopspyramide ist anscheinend leer.

SCANPYRAMIDIS

der nicht an den Arbeiten beteiligt war. Über der so genannten Königskammer im Zentrum der Pyramide gibt es ebenfalls Hohlräume, die nach derzeitigem Wissen zur Entlastung dienen.

Der neuen Entdeckung waren Untersuchungen mit der so genannten Myonentomografie vorausgegangen, die großvolumige Objekte mit Hilfe der kosmischen Strahlung dreidimensional abbilden kann. Diese Strahlung enthält unter anderem Myonen – Elementarteilchen, die in vielen Eigenschaften den Elektronen ähneln. Sie passieren Luft nahezu ungestört, werden in dichteren Materialien dagegen absorbiert oder gestreut. Gibt es Orte in einem Bauwerk, zu denen mehr Myonen vordringen, deutet das darauf hin, dass dort weniger Gestein die Teilchen abfängt. Entsprechende Messungen lassen schon seit Langem vermuten, dass es in der Großen Pyramide unbekannte Hohlräume gibt.

Es kamen sogar Spekulationen auf, ob in einem dieser Räume die Mumie von König Cheops liegen könnte, der die Pyramide erbauen ließ. Sein Sarkophag in der Königskammer war bei der Entdeckung leer gewesen. Doch Forscherinnen und Forscher gehen eher davon aus, dass sich die Mumie nicht mehr in der Pyramide befindet. Das Bauwerk ist wahrscheinlich bereits in der Antike geplündert worden.

Nature Communications 10.1038/s41467-023-36351-0, 2023

## NEUROWISSENSCHAFT

### Vierte Hirnhaut entdeckt

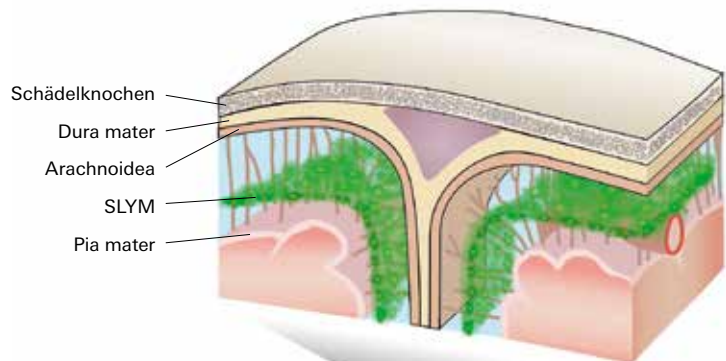
► Drei dicht aufeinanderliegende Hirnhäute schützen unser Denkorgan: Dura mater, Arachnoidea und Pia mater. Nun haben Neuromediziner um Kjeld Møllgård von der Universität Kopenhagen bei Mäusen eine vierte Schutzschicht entdeckt. Sie durchzieht den so genannten Subarachnoidalraum, der zwischen Arachnoidea und Pia mater liegt und Hirn-Rückenmarks-Flüssigkeit (»Liquor«) enthält.

Die Gruppe wollte ursprünglich untersuchen, wie sich der Liquor durch die Hirnhäute und ihre Zwi-

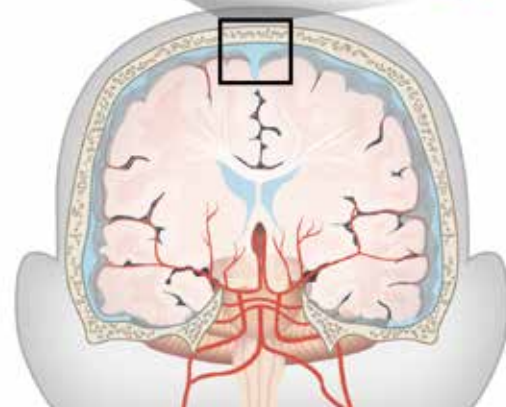
schenräume bewegt. Dafür brachte sie bei lebenden Mäusen einen fluoreszierenden Stoff in den Liquor ein und verfolgte per Mikroskop, welchen Weg er nimmt. Eine weitere Methode machte bestimmte Bindegewebsfasern sichtbar, die in den Hirnhäuten vorkommen. Zu ihrer Überraschung fanden die Fachleute entsprechendes Bindegewebe auch zwischen der Pia mater und der Arachnoidea. Es gehört zu einer bislang unbekanntem Barriere, der »subarachnoid lymphatic-like membrane« (SLYM).

Wie sich zeigte, ist die SLYM für die meisten Proteine undurchlässig. Vielleicht trennt sie »sauberen« und »verschmutzten« Liquor voneinander, womit sie eine wichtige Rolle für den Stoffaustausch und die Aufrechterhaltung der Hirnfunktion spielen würde. Offenbar ist der Transport des Liquors zwischen den Hirnhäuten besser organisiert als zuvor angenommen. Doch das ist wahrscheinlich nicht die einzige Funktion der SLYM, die dünn wie feine Seide ist: Sie enthält darüber hinaus Immunzellen. Außerdem könnte sie – so die Vermutung des Teams – als Gleitschicht dienen, um die Reibung zwischen Schädel und Hirn zu mindern.

Science 10.1126/science.adc8810, 2023



**BARRIERE** Die jetzt gefundene vierte Hirnhaut (grün) liegt zwischen der Arachnoidea und der Pia mater.



UNIVERSITY OF COPENHAGEN; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT



**FOLGENREICHE KOLLISION** Die Illustration zeigt zwei Neutronensterne kurz vor ihrer Verschmelzung. Unter solch extremen Bedingungen reichern sich Atomkerne rasch zu schwereren Elementen an.

NEUTRONENSTERNE

# Kosmische Schmiede der schweren Elemente

Die massereichsten Atome entstehen bei gewaltigen Ereignissen im Weltraum. Welche Abläufe dafür genau verantwortlich sind, war lange unklar – bis Teleskope die Folgen des energiereichen Zusammenstoßes zweier Sternüberreste enthüllten.

» [spektrum.de/artikel/2120748](https://spektrum.de/artikel/2120748)

Sanjana Curtis ist Astrophysikerin an der University of Chicago und untersucht die Kernreaktionen, die an extremen Orten im Kosmos ablaufen.



Wo immer wir hinschauen: Kleinste Bruchstücke von Sternen umgeben uns, und zum Teil bestehen wir sogar selbst daraus. Etwa die Hälfte der chemischen Elemente, die schwerer sind als Eisen, stammen aus einigen der heftigsten Sternexplosionen. Aus deren Gas und Staub gehen später neue Himmelskörper hervor. Auch auf der Erde hat sich das Leben im Lauf von 3,7 Milliarden Jahren Evolution mit Hilfe solcher besonders massereicher Atome entwickelt. Jod ist beispielsweise ein Bestandteil unserer Schilddrüsenhormone. Acantharia genannte Vertreter des Mikroplanktons im Meer besitzen komplizierte Mineralskelette, die sie mit dem Element Strontium bilden. Außerdem sind die gewichtigsten Atome aus unserer modernen Technik nicht mehr wegzudenken. Chips in Smartphones und Bildschirme in Laptops funktionieren dank Gallium. Gold ist nicht nur als Schmuck beliebt, sondern dient als Beschichtung der Spiegel des James Webb Space Telescope, weil es im infraroten Bereich des Spektrums gut reflektiert.

Dazu, wie diese und viele weitere der schwersten Bausteine unserer Welt entstanden sind, gibt es seit geraumer Zeit verschiedene wissenschaftliche Erklärungen. Die Modelle waren in ihren Details allerdings lange heftig umstritten. Das änderte sich erst 2017. In jenem Jahr gestatteten astronomische Beobachtungen zum ersten Mal einen direkten Blick auf eine spezielle Art von Nukleosynthese. Der Ablauf beginnt mit einem der seltensten Objekte im Universum: einem Neutronenstern.

Neutronensterne sind Überbleibsel von Sternen, die deutlich massereicher sind als unsere Sonne. Sie vergehen am Ende ihres Lebens in einer spektakulären Explosion und hinterlassen einen unvorstellbar dicht komprimierten Kern. Dort nimmt Materie überaus exotische Formen an.

Ein einsamer Neutronenstern würde in den Weiten des Weltraums einfach immer mehr abkühlen. Doch die

meisten massereichen Sterne befinden sich in einem Doppelsystem mit einem Begleiter. Irgendwann ereilt den Partner das gleiche Schicksal, und schließlich umkreisen zwei Neutronensterne einander. Dabei verlieren sie allmählich Bewegungsenergie. In einem Jahrtausende andauernden Tanz nähern sich die Sternüberreste deswegen spiralförmig einander an, während Gezeitenkräfte an ihnen reißen und neutronenreiche Materie mit fast einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit ins All schleudern. Letztendlich verschmelzen sie in einer dramatischen Kollision und entfachen ein kosmisches Feuerwerk über das gesamte elektromagnetische Spektrum. Das schlägt sogar Wellen im Gefüge von Raum und Zeit selbst.

### Verräterisches Aufblitzen

Ein ganz bestimmter solcher Zusammenstoß hat sich in etwa 130 Millionen Lichtjahren Entfernung ereignet, während auf unserem Planeten noch die Dinosaurier herrschten. Die Ausschläge in der Raumzeit, Gravitationswellen genannt, bahnten sich ihren Weg durch den Kosmos bis zur Milchstraße, und in der Zeit, die sie für die große Distanz brauchten, veränderte sich das Leben auf der Erdoberfläche gravierend. Arten entwickelten sich und starben aus, Zivilisationen entstanden und gingen unter, und neugierige Menschen konstruierten hochempfindliche Instrumente, mit denen sie unglaublich schwache Signale von winzigen Verzerrungen der Raumzeit aufzeichnen konnten. Auf diese Messgeräte trafen kurz darauf, im Jahr 2017, die Gravitationswellen von der Verschmelzung jener Neutronensterne. Genauso schnell kam das Licht an, das dabei ausgesandt worden war. Dessen Spektrum trug ein charakteristisches Signal mit sich, das die Produktion schwerer Elemente bezeugte.

Als Expertin für kosmische Kataklysmen faszinieren mich die dramatischen Aspekte dieser Geschichte ebenso wie die wissenschaftlichen. Mich begeistern die Entstehung von etwas Neuem aus einem vergangenen Stern sowie der Umstand, dass wir einen solchen Vorgang tatsächlich auf zwei Arten beobachten. Wir können sowohl Gravitationswellen als auch elektromagnetische Strahlung aus derselben kosmischen Quelle nachweisen. Das lässt nie da gewesene Untersuchungen von Sternexplosionen und der Synthese von Elementen zu. Die Erkenntnisse daraus haben bereits einige hartnäckige Rätsel der Astrophysik gelöst und gleichzeitig weitere Fragen aufgeworfen.

Das Bestreben, die Entstehung schwerer Atome zu verstehen, ist Teil der fundamentalen wissenschaftlichen Suche nach dem Ursprung von allem. Dabei reicht die Geschichte der Bestandteile des Periodensystems vom Urknall bis in die Gegenwart. Die drei ersten Einträge in der Tabelle, Wasserstoff, Helium und Lithium, lassen sich auf wenige Minuten nach der Geburt des Universums zurückführen. Aus diesen Atomen bildeten sich bald Sterne, die intensiv leuchteten und in ihrem Inneren sowohl während ihrer kurzen Existenz als auch bei ihrem explosiven Tod die vorhandenen Atomkerne zu schweren fusionierten. Aus den Überresten wiederum entstand

## AUF EINEN BLICK

### Alchemie im All

- 1 Viele Atomsorten bis hin zum Eisen werden von Sternen im Lauf ihres normalen Lebens hervorgerufen. Das gilt allerdings nicht für besonders schwere Elemente wie Gold und Plutonium.
- 2 Solche Atomkerne können nur bei enorm energiereichen Vorgängen entstehen. Lange gab es verschiedene konkurrierende Hypothesen dazu, wo genau im Universum die Prozesse ablaufen.
- 3 2017 verriet Gravitationswellen eine Kollision von Neutronensternen. Eine Signatur im Spektrum des Lichts bewies: Solche Verschmelzungen sind der Ursprung der schweren Elemente.

## Erstaunlich kugelförmige Explosion

Die Kilonova von 2017 lieferte einen reichhaltigen Datenschatz, dessen Analyse andauert und weiterhin für Überraschungen sorgt. Eine verblüffende Erkenntnis betrifft die geometrische Form der Explosion, also ihre Ausbreitung zu verschiedenen Seiten. Bei einem System aus sich eng umkreisenden Objekten erwartet man eigentlich eine asymmetrische Struktur, die in der Rotationsebene anders aussieht als entlang der Pole. Im Februar 2023 stellte ein Team um Albert Sneppen von der Universität Kopenhagen allerdings fest, dass sich die Kilonova in beide Richtungen gleich schnell fortpflanzte. Hinter dieser Symmetrie vermutet der Physiker unerwartete Effekte: »Die wahrscheinlichste Erklärung dafür ist, dass eine enorm kraftvolle Explosion die Asymmetrien in der Umgebung glättet. Die Kugelform deutet daher auf eine unerwartet starke Energiefreisetzung im Kern hin.« Bei der Verschmelzung entsteht wohl kurzfristig ein übermäßig schwerer Neutronenstern, der nach Millisekunden zu einem Schwarzen Loch kollabiert. Sneppen spekuliert auf eine besondere Rolle der noch immer in vielen Aspekten mysteriösen Neutrinos. »Während seiner begrenzten Lebensdauer könnte der hypermassereiche Neutronenstern intensive Neutrinostrahlung abgeben.« Das würde außerdem erklären, warum nicht nur Strahlung allgemein, sondern auch extrem schwere Elemente weniger asymmetrisch herausgeschleudert wurden als gedacht: »Neutrinos wandeln Neutronen in Protonen und Elektronen um«, erklärt Sneppen. Diese Neutronen fehlen dann für den r-Prozess. »So könnten insgesamt mehr vergleichsweise leichte Elemente entstehen.«

### QUELLE

Sneppen, A. et al.: Spherical symmetry in the kilonova AT2017gfo/GW170817. Nature 614, 2023

die nächste Generation von Sternen. Der Prozess aus Werden und Vergehen setzt sich bis heute fort, und mit jedem Zyklus bereichert er den Kosmos um Elemente bis hin zum Eisen mit 26 Protonen im Atomkern.

Was die Atomgewichte jenseits des Eisens angeht, gibt es seit einigen Jahrzehnten die Hypothese, dass etwa die Hälfte dieser Elemente beim schnellen Neutroneneinfang entstehen, einem Vorgang, der r-Prozess genannt wird (kurz für englisch: »rapid«). Der Rest lässt sich auf langsamen Neutroneneinfang (s-Prozess, für »slow«) zurückführen, eine relativ gut verstandene Abfolge von Reaktionen in Sternen. Die schwersten bisher bekannten Elemente, Tenness mit 117 Protonen und Oganesson mit 118, kommen in der Natur überhaupt nicht vor. Sie wurden in Teilchenbeschleunigern erzeugt, wo sie nach nur Tausendsteln von Sekunden wieder zerfallen.

Sowohl beim r- als auch beim s-Prozess werden einem Atomkern ein oder mehrere Neutronen hinzugefügt. Allein dadurch entsteht jedoch noch kein schwereres Element, da ein Element durch die Anzahl der Protonen im Kern definiert ist. Vielmehr erhält man ein Isotop derselben

Atomsorte, das heißt, der Kern besitzt die gleiche Menge Protonen, aber mehr Neutronen. So ein Isotop ist oft instabil und radioaktiv. Durch den so genannten Beta-Minus-Zerfall verwandelt sich ein Neutron in ein Proton, wobei zusätzlich ein Elektron und ein weiteres Elementarteilchen namens Neutrino entstehen. Erst so erhöht sich die Protonenzahl im Atomkern, und ein neues Element geht hervor.

Der Hauptunterschied zwischen den beiden Prozessen ist die Geschwindigkeit. Beim langsamen s-Prozess hat das Neutron nach dem Einfangen genügend Zeit, um unter anderem in ein Proton zu zerfallen und das nächste stabile Element im Periodensystem mit einem Proton mehr zu bilden, bevor ein weiteres Neutron dazustößt. In den Sternen, in denen der s-Prozess abläuft, geschieht das über Jahrtausende, weil die dort herumfliegenden Neutronen dünn gesät sind und nur gelegentlich von Atomen aufgenommen werden.

Im Gegensatz dazu erzeugt der r-Prozess eine umfassende Palette an schweren Elementen in einem einzigen, kaum eine Sekunde dauernden schöpferischen Blitz.

ALBERT SNEPPEN, NIELS BOHR INSTITUTE (ERSTELLT MIT DALI-E)



**SPHÄRISCHES SPEKTAKEL**  
Kurz nach der Explosion formte die Strahlung eine Kugelschale wie in dieser Illustration.

# Kosmische Atomschmiede

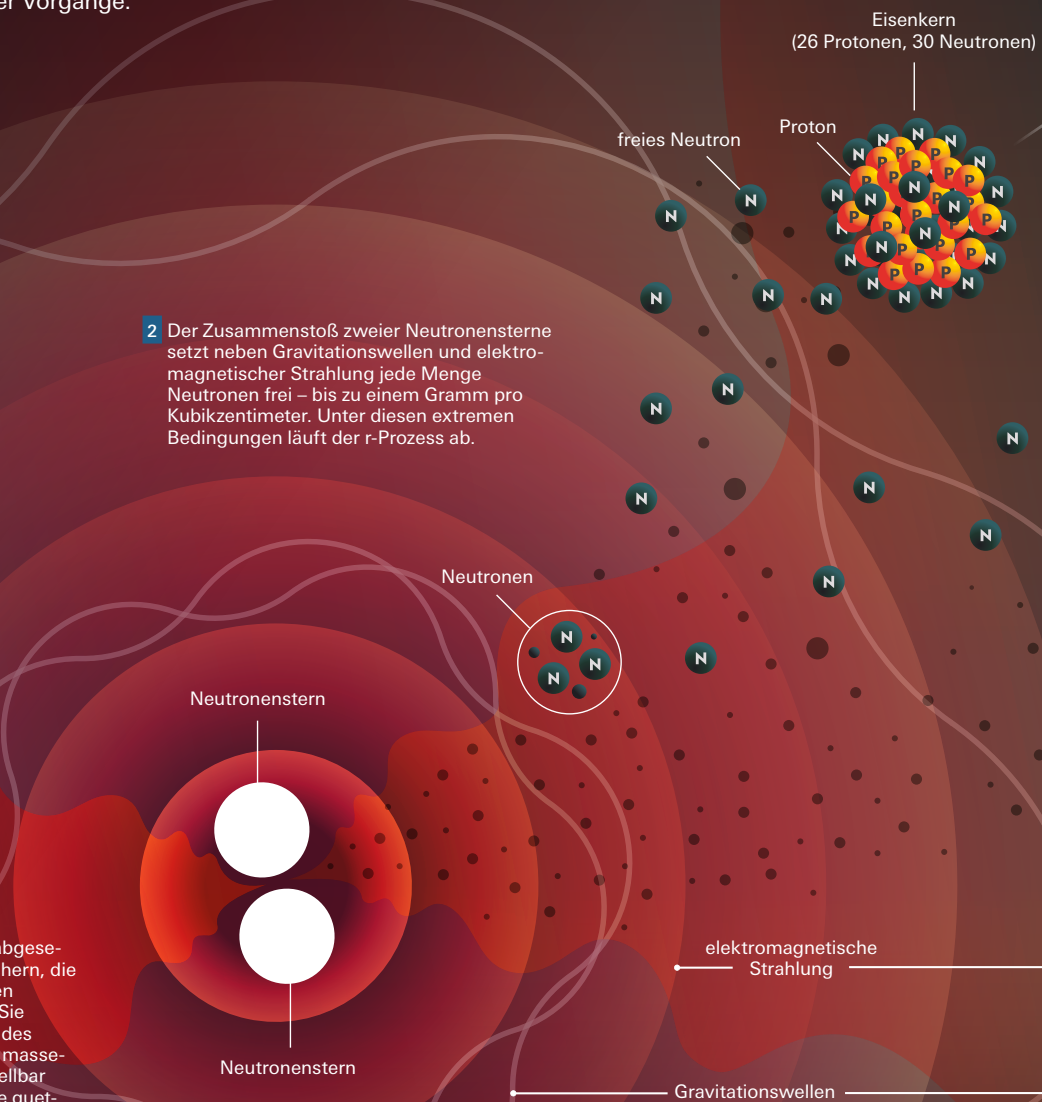
Die meisten leichteren Atome vom Helium bis hin zum Eisen mit 26 Protonen im Kern gehen aus den Fusionsprozessen im Inneren von Sternen hervor. Doch jenseits davon wird es rätselhafter. Gold mit 79 Protonen in jedem Atom kann ebenso wenig auf diese Weise entstehen wie etwa Platin, Xenon, Radon und viele so genannte seltene Erden.

Jahrzehntelang war umstritten, woher solche Elemente stammen. Die Grafik erläutert die führende Hypothese, laut der ein höchst gewaltsames Ereignis im Weltraum die Ursache ist. Bis vor einigen Jahren gab es dafür keinen Nachweis durch Beobachtungen, aber dann registrierten Teleskope zur gleichen Zeit Gravitationswellen und Licht von einem Zusammenstoß zweier Neutronensterne. Das untermauerte nicht nur Modelle, sondern lieferte überdies Daten zum Ablauf solcher Vorgänge.

3 Beim r-Prozess prallen Neutronen auf einen vorhandenen Atomkern, etwa Eisen, das schwerste Element, das bei der Fusion in einem Stern entstehen kann. Der Kern beginnt mit 26 Protonen und üblicherweise um die 30 Neutronen. Durch das Bombardement mit freien Neutronen lagern sich etliche von ihnen innerhalb von Millisekunden an.

2 Der Zusammenstoß zweier Neutronensterne setzt neben Gravitationswellen und elektromagnetischer Strahlung jede Menge Neutronen frei – bis zu einem Gramm pro Kubikzentimeter. Unter diesen extremen Bedingungen läuft der r-Prozess ab.

1 Neutronensterne sind, abgesehen von Schwarzen Löchern, die am dichtesten gepackten Objekte im Universum. Sie entstehen beim Kollaps des Kerns eines sterbenden massereichen Sterns. Unvorstellbar starke Gravitationskräfte quetschen die Protonen und Elektronen in Atomen zu Neutronen zusammen. Aus diesen besteht der Sternüberrest fast ausschließlich.

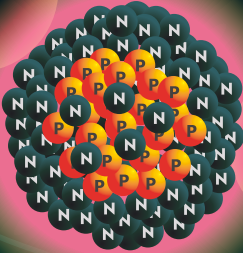


JASON DRAKEFORD / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2022, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

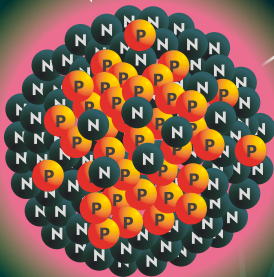


4 Wegen des krassen Überschusses an Neutronen ist der daraus hervorgegangene Atomkern hochgradig radioaktiv.

radioaktiver Eisenkern mit einer großen Neutronenzahl



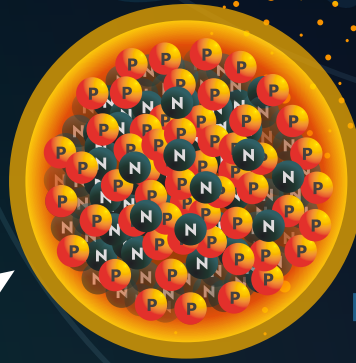
Betastrahlung



Betastrahlung

5 Einige der Neutronen werden zu Protonen und senden dabei Betastrahlung aus. Diese Art des radioaktiven Zerfalls wandelt eines der Quarks im Neutron um und sendet zugleich ein Elektron und ein Antineutrino aus. Unter fortwährendem Neutroneneinfang und Betazerfall gehen immer schwerere Atomkerne hervor.

Goldkern (79 Protonen, 118 Neutronen)



6 Das Ergebnis ist ein neues Element, in diesem Fall Gold mit 79 Protonen im Kern.

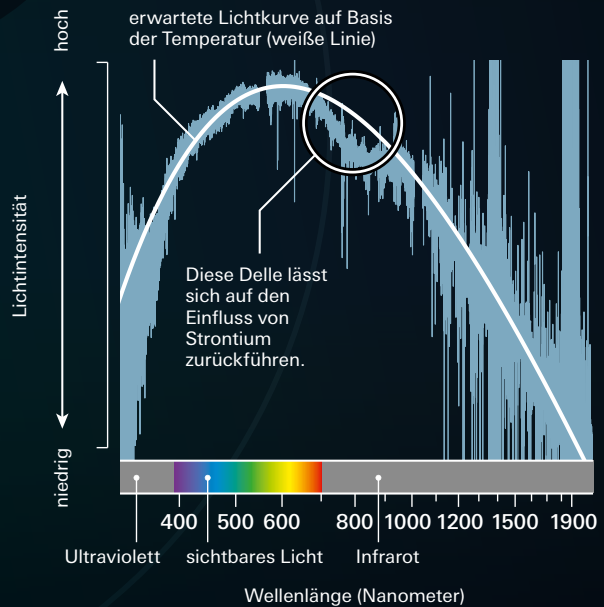
Mit einem Ring aus Gold oder Platin trägt man ein Souvenir eines solchen kosmischen Spektakels.



JASON DRAKEFORD / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2023, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## Direkter Nachweis

Die ersten klaren Daten, mit denen sich der r-Prozess belegen ließ, entstammen einer Verschmelzung von Neutronensternen, von der uns Licht und Gravitationswellen gleichzeitig erreicht haben. Das schwere Element Strontium hat dem Spektrum der aufgezeichneten Strahlung seine charakteristische Signatur aufgeprägt. Es war also bei demselben Vorgang zugegen, der die Raumzeit erschüttert hat.



JASON DRAKEFORD, NACHI WATSON, D. ET AL. / IDENTIFICATION OF STRONTIUM IN THE MERGER OF TWO NEUTRON STARS. ARXIV:1910.10510, 2019. FIG. 7 / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2023, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## Elemente aus dem r-Prozess

Die Bestandteile des Periodensystems stammen aus verschiedenen Quellen. Wasserstoff, Helium und Lithium sind bereits kurz nach dem Urknall entstanden. Andere leichte Elemente gehen aus den Fusionsprozessen in Sternen hervor. Die hier gelb markierten Atomsorten kommen hingegen entweder vollständig oder zum Teil aus dem r-Prozess, bei dem leichte Kerne sehr schnell Neutronen einsammeln, die zu Protonen zerfallen.

H																	He				
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Gallium	Germanium	Arsen	Selen	Brom	Krypton				
Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirkonium	Niob	Molybdän	Tc	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silber	Kadmium	Indium	Zinn	Antimon	Tellur	Iod	Xenon				
Cäsium	Barium		Hafnium	Tantal	Wolfram	Rhenium	Osmium	Iridium	Platin	Gold	Quecksilber	Thallium	Blei	Bismut	Po	At	Rn				
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og				
		Lanthan	Cer	Praseodym	Neodym	Pm	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium					
		Ac	Thorium	Pa	Uran	Np	Plutonium	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr					

● Diese Elemente aus dem Sonnensystem dürften ursprünglich aus dem r-Prozess hervorgegangen sein.

JER CHRISTENSEN, MACH JOHNSON, J.A.: POPULATING THE PERIODIC TABLE: NUCLEOSYNTHESIS OF THE ELEMENTS. SCIENCE 363, 2019. UND MACH SNEDEK, C. ET AL.: NEUTRON CAPTURE ELEMENTS IN THE EARLY GALAXY. ANNUAL REVIEW OF ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS 46, 2008 / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2023. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Reichlich vorhandene Neutronen bombardieren nacheinander einen Kern, bevor er Zeit zum Zerfall hat. Der Atomrumpf bläht sich so in kürzester Zeit zu einem hochgradig instabilen Isotop auf, bis hin zur »Abbruchkante«. Diese (auch nach dem englischen Begriff Dripline genannte) Grenze ist das höchstmögliche Verhältnis von Neutronen zu Protonen. Jenseits der Abbruchkante würde für weitere Neutronen keine Bindungsenergie mehr frei.

Der auf eine enorme Masse aufgepumpte Kern wandelt schließlich viele seiner Neutronen durch Betazerfall in Protonen um oder zerbricht sogar in kleinere Stücke. Dadurch entsteht eine Reihe von stabilen schweren Elementen. Viele Details dieses Vorgangs sind noch unklar, und in etlichen Zwischenschritten können exotische Kerne hervorgehen, die theoretisch nicht gut verstanden sind. Die Abläufe sprengen die Grenzen bestehender Modelle. Sie in heutigen Laboren nachzustellen und zu vermessen ist schwierig, mitunter sogar unmöglich.

Mit der Zeit sind viele Hypothesen dazu entstanden, an welchen Orten im Universum der r-Prozess stattfinden könnte. Mehr als sechs Jahrzehnte lang blieb allerdings offen, wo genau es tatsächlich dazu kommt – das war eines der größten Rätsel der nuklearen Astrophysik. Beispielsweise galten so genannte Kernkollaps-Superno-

vae als heiße Kandidaten für Heimstätten des r-Prozesses. Dabei handelt es sich um Explosionen von Sternen mit mehr als der acht- bis zehnfachen Masse unserer Sonne. Doch bei Simulationen typischer Kernkollaps-Supernovae im Computer ließen sich die erforderlichen Neutronenmengen und thermodynamischen Bedingungen nicht gut reproduzieren, mit Ausnahme seltener Ereignisse unter Beteiligung starker Magnetfelder.

1974 berechneten die Astrophysiker James Lattimer und David Schramm, die damals an der University of Texas in Austin arbeiteten, ein Szenario, bei dem Neutronensterne die Zutaten für den r-Prozess liefern. Ein Neutronenstern entsteht, wenn einem massereichen Stern der Brennstoff ausgeht. Daraufhin kollabiert die Materie infolge ihrer Schwerkraft und drückt mit überwältigender Kraft immer weiter nach innen. Das komprimiert die Zentralbereiche auf eine unvorstellbar hohe Dichte, die Elektronen und Protonen zu Neutronen zusammenquetscht. Während die äußeren Hüllen des Sterns bei einer Supernova herausgeschleudert werden, bleibt der Neutronenstern intakt. Dieser kompakte Überrest enthält die dichteste bekannte Materie im Universum.

Jenseits einer bestimmten Masse kollabieren Neutronensterne haltlos weiter zu Schwarzen Löchern. Aber es

ist weder der genaue Punkt des Übergangs bekannt noch, wie gut sich Neutronensterne zusammendrücken lassen, das heißt ihre innere Struktur. Sie könnten unter einer oberflächlichen Kruste aus schwereren Kernen hauptsächlich Neutronen und einen kleinen Anteil Protonen enthalten. Möglicherweise ist ihr Innenleben allerdings noch merkwürdiger und beherbergt besonders bizarre Formen der Materie aus Quarks, den Bausteinen von Protonen und Neutronen.

### Von wo genau kommen die Atome?

Die Idee von Lattimer und Schramm: Bei der Kollision eines Neutronensterns mit einem Schwarzen Loch sollten jede Menge Neutronen frei werden, die den r-Prozess antreiben. 1982 veröffentlichte Schramm gemeinsam mit Eugene Symbalisty von der University of Chicago Berechnungen zu einem verwandten Szenario, bei dem zwei Neutronensterne verschmelzen.

Ein Teil der Fachwelt arbeitete daraufhin intensiv an einem Verständnis darüber, wie diese Zusammenstöße neue Elemente hervorbringen könnten. Die Forschungsgruppen konzentrierten sich vor allem auf die Vereinigung von Neutronensternen und versuchten vorherzusagen, welche Art von Licht dabei zu erwarten wäre. Einige vermuteten einen Zusammenhang mit Gammastrahlenausbrüchen. Das sind kosmische Explosionen, die einen Blitz aus äußerst energiereicher Strahlung aussenden.

Da die Kerne beim r-Prozess radioaktiv zerfallen, heizen sie ihre Umgebung auf. Das dabei entfachte elektromagnetische Feuerwerk trägt charakteristische Signaturen der daran beteiligten Elemente. 2010 prägte das Team um Brian Metzger von der Columbia University in New York den Begriff Kilonova für solche Ereignisse. Der Name bezieht sich auf Lichtblitze, die Nova heißen. Eine Kilonova sollte laut Metzgers Berechnungen etwa 1000-mal heller leuchten. Diese intensiven theoretischen Arbeiten harrten einer direkten Bestätigung – bis zu jener bemerkenswerten Beobachtung von 2017.

Der grundsätzliche Nachweis von Beben in der Raumzeit war kurz zuvor mit dem Observatorium LIGO in den USA gelungen. Die ersten, im September 2015 aufgezeichneten Gravitationswellen wurden von zwei miteinander verschmelzenden Schwarzen Löchern erzeugt. Das Ereignis erhielt den Namen GW150914. Zu jener Zeit studierte ich an der North Carolina State University in Raleigh, und wir alle verfolgten im Gemeinschaftsraum unseres Instituts die öffentliche Verkündung. Als ich mich näher über die physikalischen Hintergründe informierte, wurde mir klar, dass die Kollision von Neutronensternen weniger energiereich und somit schwieriger zu entdecken sein würde als die von Schwarzen Löchern. Doch die Hoffnungen, so ein Ereignis würde ebenfalls bald aufgedeckt, wurden nicht enttäuscht.

Zunächst zeichneten LIGO und sein europäisches Pendant Virgo immer mehr Kollisionen von Schwarzen Löchern auf. Dann hörte ich im Herbst 2017 Gerüchte, zum ersten Mal sei eine Neutronensternkollision beobachtet worden. Mehr noch, neben dem Gravitationswellen-

signal hätten andere Detektoren einen kurzen Gammastrahlenausbruch aufgefangen sowie etwas, was eine Kilonova gewesen sein könnte. Die Aufregung in der physikalischen Gemeinschaft war groß. Tatsächlich gaben die beteiligten Teams bald eine Beobachtung mit der Bezeichnung GW170817 bekannt und berichteten von damit verbundenen elektromagnetischen Signalen (siehe »Spektrum« Januar 2018, S. 58). Unmittelbar darauf gab es reihenweise Veröffentlichungen über GW170817.

Das Ereignis wurde als Durchbruch bei der »Multi-messenger-Astronomie« gefeiert. Hierbei geht es darum, ein kosmisches Ereignis mittels grundverschiedener Arten von Teleskopen aufzuzeichnen, die Informationen zu kombinieren und so zu einem umfassenderen Verständnis zu gelangen. 2017 waren zum ersten Mal Gravitationswellen von derselben Quelle zu detektieren wie sichtbares Licht sowie Radio- und Röntgenstrahlung.

Die Entfernung von etwa 130 Millionen Lichtjahren klingt sehr groß, ist aber verglichen mit üblichen Ausgangsorten von Gravitationswellen sehr nah. Anhand der Signaldetails wie der zeitlichen Veränderung von Frequenz und Intensität gelang die Abschätzung, dass jeder Neutronenstern etwa das 1,17- bis 1,6-Fache der Masse unserer Sonne und einen Radius von elf bis zwölf Kilometern hatte. Da LIGO und Virgo auf verschiedenen Kontinenten stehen, war durch den Abgleich der Messungen der Ursprung des Gravitationswellensignals auf einen engen Himmelsbereich eingrenzbar. Aus der gleichen Richtung orteten die Gammateleskope Fermi-GBM und

### Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

[spektrum.de/t/gravitationswellen](https://www.spektrum.de/t/gravitationswellen)



SAKKMESTERKE / STOCKADobe.COM

INTEGRAL nur 1,7 Sekunden nach dem Eintreffen der Wellen von GW170817 einen schwachen Strahlungsausbruch, der nur wenige Sekunden dauerte. Weitere Aufnahmen, etwa mit dem Ein-Meter-Teleskop Henrietta Swope am Las-Campanas-Observatorium in Chile, zeigten überdies einen neuen leuchtenden Punkt in der Galaxie NGC 4993. Das Licht ließ sich in seine einzelnen Farben zerlegen, und das Spektrum deutete auf das Vorhandensein schwerer Elemente hin. Wir hatten es hier also wirklich mit einer Kilonova zu tun.

Ihr Spektrum veränderte sich im Lauf der Zeit auf interessante Weise. Kürzere blaue Wellenlängen erreichten früh ein Maximum, und während einer späteren Phase der Verschmelzung dominierten längere rote Wellenlängen. Die jeweiligen Spitzenwerte lassen sich

## »Trifft ein Neutronenstern ein Schwarzes Loch ...«

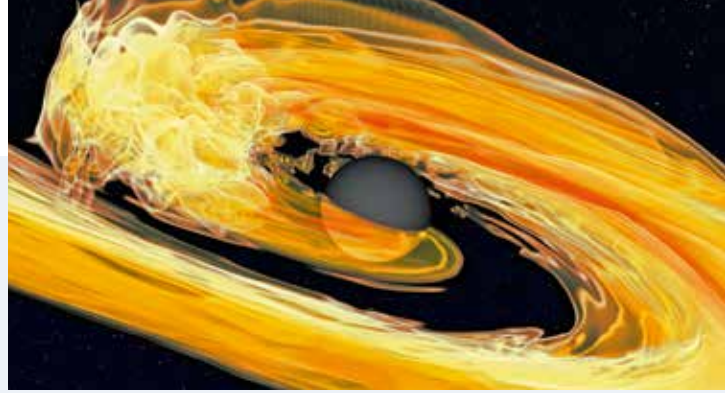
Die Kollisionen Schwarzer Löcher sind zwar für die allermeisten der bislang detektierten Gravitationswellenereignisse verantwortlich. Aber sie spielen für die Produktion neuer Elemente keine nennenswerte Rolle, weil aus Schwarzen Löchern keine Materie entkommt.

Beim Aufeinandertreffen zweier Neutronensterne hingegen zerreißen beide, und es entsteht auf einen Schlag das Vieltausendfache der Erdmasse an schweren Metallen. Solche Zusammenstöße wurden bis Anfang 2023 erst zweimal mittels Gravitationswellen nachgewiesen: 2017 und 2019. In letzterem Fall ließ sich kein optisches Gegenstück sicher identifizieren, weil die Kollision weiter entfernt lag (uns also weniger hell erscheinen würde) und sich der in Frage kommende Himmelsbereich nicht gut genug eingrenzen ließ.

Quasi als Kombination beider Szenarien ist noch eine dritte Art von Verschmelzung möglich: Ein Neutronenstern prallt auf ein Schwarzes Loch. Tatsächlich wurden im Januar 2020 innerhalb von nur zehn Tagen die Gravitationswellen gleich zweier solcher Vorkommnisse registriert. Leider jeweils ohne detektiertes Licht; allein die Massen der beteiligten Objekte haben deren Charakter als typische Neutronensterne (mit etwa 1,9 beziehungsweise 1,5 Sonnenmassen) und Schwarze Löcher (mit grob 9 und 6 Sonnenmassen) offenbart.

Prinzipiell entstehen dabei ebenfalls reichlich schwere Elemente. Das Schwarze Loch zerrt immer stärker am Neutronenstern, bis er durch die enormen Gezeitenkräfte zerrissen und verwirbelt wird. Freigesetzte Neutronen schleudern umher und kurbeln den r-Prozess an. Doch wie effektiv läuft dieser ab, gerade im Vergleich mit dem Zusammenstoß zweier Neutronensterne?

Verschiedene Forschungsgruppen suchen mittels aufwändiger Computermodelle nach einer Antwort. Einen systematischen Vergleich haben die LIGO-Physikerin Hsin-Yu Chen und ihr Kollege Salvatore Vitale vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge zusammen mit dem auf solche Simulationen spezialisierten Francois Foucart von der University of New Hampshire in Durham im Oktober 2021 präsentiert. Für die Arbeit nutzten sie einerseits die Gravitationswellendaten zu den jeweiligen Entdeckungen, andererseits umfangreiche numerische Berechnungen. Zu unterschiedlichen Szenarien betrachteten sie jeweils 100 000 Verschmelzungen. Ihr Fazit: Die Produktion schwerer Elemente hängt zwar von vielen Parametern ab, unter anderem davon, wie genau sich die einzelnen Objekte relativ zueinander drehen. Aber insgesamt dürften Verschmelzungen zwischen zwei Neutronensternen im Lauf der vergangenen 2,5 Milliarden



**UNGLEICHES DUELL** In einer Simulation wird ein Neutronenstern von den Gezeitenkräften nahe eines Schwarzen Lochs zerrissen.

Jahre dem Kosmos mehr schwere Elemente beschert haben als Situationen, bei denen ein Neutronenstern von einem Schwarzen Loch eingefangen wird. Konkret sollten ineinanderstürzende Paare von Neutronensternen das etwa 2- bis 100-Fache an schweren Elementen produziert haben.

Nach der ungleichen Zusammenkunft bildet sich aus den Überresten eine Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch. In diesem Mahlstrom können weiterhin schwere Elemente entstehen und einen beträchtlichen Anteil an der Gesamtproduktion ausmachen. Das hat die Autorin dieses Artikels, Sanjana Curtis, mit ihrem Team bei im Dezember 2022 publizierten Simulationen herausgefunden. In welchem Ausmaß der r-Prozess stattfindet und Atome in die Umgebung freisetzt, hängt stark von den Details des Vorgangs und den Eigenschaften der Partner ab. Deswegen, so Curtis, müsse man mit einer großen Spanne an beobachtbaren Phänomenen rechnen.

Um welche es sich dabei handeln könnte, hat die Arbeitsgruppe von Kenta Kiuchi von der Universität Kyoto und dem Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam im Juli 2022 demonstriert. Ihre Simulation der ersten zwei Sekunden des Prozesses, die allein zwei Monate auf einem Rechnerverbund in Anspruch nahm, zeigte im Detail, wie aus der Akkretionsscheibe mit etwa einem Viertel der Sonnenmasse Material vom Schwarzen Loch abgezogen wurde. Es wurde in gebündelte Jets intensiver elektromagnetischer Strahlung umgesetzt – der Ursprung eines typischen kurzen Gammablitzes.

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

### QUELLEN

**Chen, H.-Y. et al.:** The relative contribution to heavy metals production from binary neutron star mergers and neutron star-black hole mergers. *The Astrophysical Journal Letters* 920, 2021

**Curtis, S. et al.:** Nucleosynthesis in outflows from black hole-neutron star merger disks with full GRVMHD. *ArXiv* 2212.10691, 2022

**Hayashi, K. et al.:** General-relativistic neutrino-radiation magnetohydrodynamic simulation of seconds-long black hole-neutron star mergers. *Physical Review D* 106, 2022

durch die Zusammensetzung und die Geschwindigkeit des ausgestoßenen Materials erklären. Sich schnell bewegende Komponenten rufen den blauen Teil der Kilonova hervor. Sie bestehen hauptsächlich aus vergleichsweise leichten Elementen ohne Beteiligung der so genannten Lanthanoide. Das sind die sich chemisch ähnelnden Metalle des Periodensystems von Lanthan bis Lutetium, die für blaues Licht ziemlich undurchsichtig sind. Der rötliche Aspekt der Kilonova beruht dagegen auf sich langsamer bewegenden Auswürfen. Sie enthalten schwerere Elemente, darunter Lanthanoide.

### Fährtenlesen in den Lichtkurven

Mit der Frage, woher genau diese unterschiedlichen Komponenten bei der Kollision stammen, begeben wir uns auf das unsichere Terrain von Modellen und Simulationen. Es ist hinsichtlich vieler Aspekte offen, wie das Material ausgeworfen wird, woraus es besteht und wie sich die Kilonova entwickelt. Die Spektren solcher Ereignisse sind nicht einfach zu entschlüsseln. Da die Atome schnell umherfliegen, verschmieren und vermischen sich ihre charakteristischen Fingerabdrücke. Außerdem gibt es für die atomaren Eigenschaften vieler schwerer Elemente noch nicht hinreichend präzise Messdaten, was die Vorhersage der spektralen Signaturen erschwert. Das einzige plausibel nachgewiesene konkrete Element in der Lichtkurve der Kilonova GW170817 ist laut einer 2019 veröffentlichten eingehenden Datenanalyse Strontium. Immerhin: Das reicht bereits als Beleg dafür, dass der r-Prozess stattgefunden hat.

Die Entdeckung hat jahrzehntelange theoretische Vorhersagen bestätigt. Endlich gibt es eine nachgewiesene Verbindung zwischen Gammablitzes und der Verschmelzung von Neutronensternen. Dank der spektralen Signaturen ist klar, dass Neutronensternkollisionen zu den Vorgängen gehören, die das Universum über den r-Prozess mit schweren Elementen anreichern.

Aber es gibt noch eine Menge zu analysieren und zu entdecken. Der Mechanismus für die Erzeugung der Gammablitzes ist bisher nicht entschlüsselt. Ebenso wenig ist die Rolle der Neutrinos klar. Sie treten in enormer Menge auf und verändern die Eigenschaften der ausgestoßenen Materie, doch ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen dieser Elementarteilchen mittels theoretischer Modelle und Computersimulationen erfordert einen immensen Rechenaufwand. Außerdem ist offen, was für ein Objekt hervorgegangen ist. Es könnte sich um einen weiteren Neutronenstern handeln, ein instabiles Objekt auf dem Weg zu einem Schwarzen Loch, oder alles ist direkt zu einem Schwarzen Loch geworden.

Zudem läuft der r-Prozess nicht bloß bei Verschmelzungen zweier Neutronensterne ab, sondern auch an anderen Orten im Weltraum. Weitere Möglichkeiten sind beispielsweise seltene Sternexplosionen und Kollisionen von Neutronensternen mit Schwarzen Löchern. Der Ursprung schwerer Elemente lässt sich nicht anhand einer einzigen Beobachtung aufdecken, so außergewöhnlich sie sein mag. GW170817 ist erst der Anfang.

Ohnehin werden nicht alle Kilonovae so aussehen wie die mit GW170817 verbundene. Vermutlich kommen sie in vielerlei Gestalt, und wir müssen auf Überraschungen gefasst sein. Tatsächlich gab es eine solche bei einer im Dezember 2022 veröffentlichten Analyse: Ein Team um die Doktorandin Jillian Rastinejad von der Northwestern University in Evanston hat einen knapp eine Minute langen Ausbruch von Gammastrahlung mit einer Kilonova in Verbindung gebracht. Normalerweise dürfte ein Gammablitz nach einer Verschmelzung kaum zwei Sekunden andauern. Deswegen vermutete Rastinejad als Ursache zunächst den Kollaps eines massereichen Sterns. Doch bei Nachfolgebeobachtungen zeigte sich in den Teleskopdaten die charakteristische Blau-zu-Rot-Lichtkurve einer Kilonova. Völlig unerwarteterweise können fusionierende Neutronensterne offenbar auch lange Gammastrahlenausbrüche verursachen.

Für ein umfängliches Bild müssen verschiedene Disziplinen zusammenarbeiten: die Gravitationswellenastronomie, die beobachtende Astronomie mit der Untersuchung junger und alter Sterne sowie die Nuklear- und Teilchenphysik für Modelle der Atomkerne und der Materie im Inneren von Neutronensternen. Experimente an Beschleunigern ermitteln die Eigenschaften instabiler Kerne, und Computer simulieren die Ereignisse, was selbst auf Hochleistungsrechnern mitunter Monate dauert.

Die bestehenden Gravitationswellendetektoren werden immer empfindlicher. Unterdessen kommen neue Teleskope hinzu, mit denen sich der Himmel besser nach den flüchtigen Ereignissen absuchen und deren Licht einfangen lässt. Großanlagen wie die im Mai 2022 an der Michigan State University in East Lansing eröffnete Facility for Rare Isotope Beams spezialisieren sich darauf, die Eigenschaften seltener Isotope genau zu vermessen. Weitere Gravitationswellenobservatorien sind geplant, etwa das Einstein-Teleskop in Europa.

Heute profitieren wir von den jahrzehntelangen Fortschritten in etlichen Forschungsbereichen und besitzen das nötige Instrumentarium für einen klaren Blick auf den Ursprung schwerer Elemente. Das versetzt uns endlich in die Lage, alle Puzzleteile zusammenzufügen. Jedes Isotop eines jeden Elements im Periodensystem kann uns etwas über die nukleare Geschichte des Universums verraten. ◀

### QUELLEN

**Lattimer, J.M., Schramm, D.N.:** Black-hole-neutron-star collisions. *Astrophysical Journal* 192, 1974

**Metzger, B.D. et al.:** Electromagnetic counterparts of compact object mergers powered by the radioactive decay of r-process nuclei. *MNRAS* 406, 2010

**Rastinejad, J.C. et al.:** A kilonova following a long-duration gamma-ray burst at 350 Mpc. *Nature* 612, 2022

**Symbalisty, E., Schramm, D.N.:** Neutron star collisions and the r-process. *Astrophysical Letters* 22, 1982

**Watson, D. et al.:** Identification of strontium in the merger of two neutron stars. *Nature* 574, 2019

PHOTOKATALYSATOREN

# Bewegte Ladungen präzise verfolgt

**Spezielle Katalysatoren spalten unter Lichteinfall Wassermoleküle. Die Kombination verschiedener Techniken gestattete nun einen detaillierten Blick auf die dabei ablaufenden entscheidenden Ladungsverschiebungen. Mit dem neuen Wissen sollten sich effizientere Stoffe zur Energiegewinnung aus Sonnenlicht entwickeln lassen.**

Die Sonne hat ein enormes Potenzial als Energielieferant: Was in nur einer Stunde von ihrer Strahlung auf die Erde trifft, entspricht dem jährlichen Energiebedarf der Menschheit. Dafür muss das Licht allerdings nutzbar gemacht werden, zum Beispiel elektrisch, chemisch oder thermisch. Handelsübliche Solarzellen erzeugen Elektrizität. Für manche Anwendungen etwa im Transportwesen wäre es praktischer, die Energie direkt auf Brennstoffmoleküle zu übertragen.

Eine viel versprechende Technologie hierfür sind von Licht aktivierte Katalysatoren. Solche so genannten Photokatalysatoren wandeln Sonnenenergie in chemische Energie um und speichern sie in den Bindungen von Brennstoffmolekülen. Fortschritte in deren Entwicklung hängen nicht zuletzt von einem besseren Verständnis davon ab, wie genau elektrische Ladungen in den Photokatalysatoren erzeugt und transportiert werden.

Diese Vorgänge spielen sich auf extrem unterschiedlichen Zeit- und Größenskalen ab. Das erschwert genaue Untersuchungen. Jetzt ist es einem Team um Ruotian Chen und Zefeng Ren vom chinesischen Dalian National Laboratory for Clean Energy gelungen, angeregte Ladungsträger auf einzelnen Photokatalysator-Partikeln zu verfolgen – in beeindruckender räumlicher und zeitlicher Auflösung. Solche Methoden können entscheidende Einblicke in photokatalytische Prozesse gewähren und beim zielgenauen Design effizienterer Materialien helfen.

Bei der Photokatalyse absorbiert ein Halbleiter die Strahlung der Sonne. Dadurch werden Elektronen im Material, die sich in einem niederenergetischen Zustand im »Valenzband« befinden, zum Übergang in das energetisch höher gelegene »Leitungsband« angeregt. Die dergestalt mobilisierten Ladungsträger können dann aus dem Halbleiter auf ein Molekül wandern, das an der Oberfläche des Katalysators adsorbiert ist. Gleichzeitig nehmen im Valenzband unbesetzte Plätze, die positiv geladenen so genannten Löcher, Elektronen aus dem Molekül auf. Mit solch einer fein abgestimmten Addition und Subtraktion von Elektronen treibt der Photokatalysator an seiner Oberfläche komplexe Redoxreaktionen von Molekülen an.

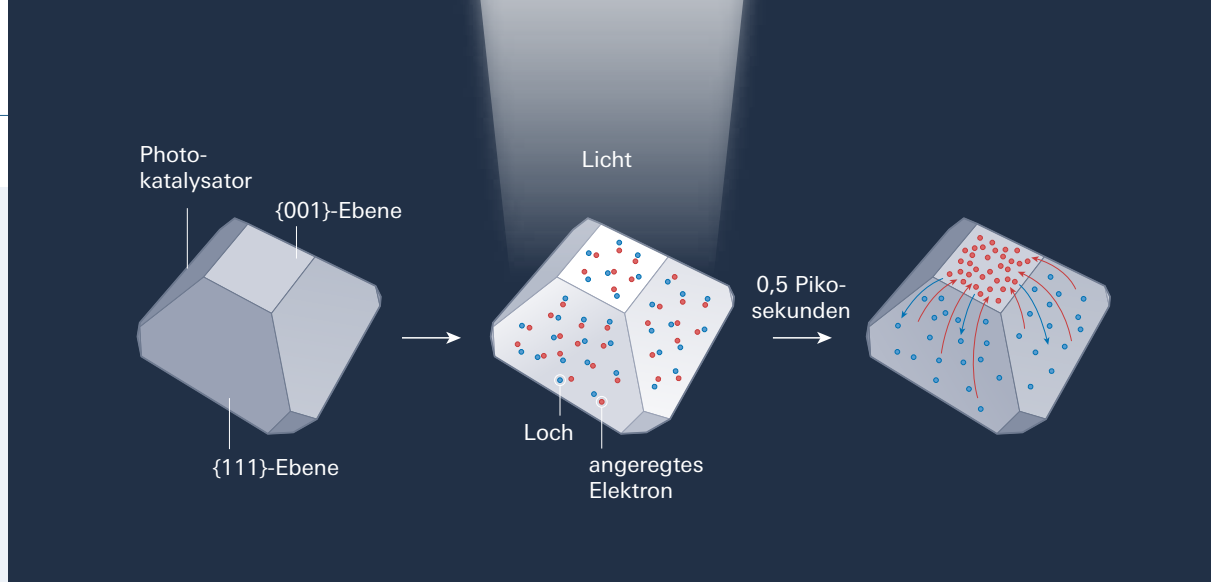
## Mit Kupfer zu Sauerstoff und Wasserstoff

Dabei ist die Spaltung von Wassermolekülen technisch besonders reizvoll. Hierbei entstehen Sauerstoff und Wasserstoff. Verbrennt man Letzteren, erhält man wiederum nur Wasser. Der Zyklus ist also völlig umweltneutral. Die chinesische Gruppe hat kleine Kristalle aus Kupferoxid untersucht, die in Verbindung mit einem geeigneten Cokatalysator Wasser spalten.

Die Kupferoxid-Partikel sind nach außen durch zwei Arten von Flächen begrenzt. In einer für Kristallformen üblichen Notation heißen sie {001}- und {111}-Ebenen. Das entspricht unterschiedlichen Richtungen im Kristallgitter des Materials (siehe »Schnelle Ladungstrennung«). Die

Forscher stellten Kristalle her, bei denen die Oberflächen der beiden Ebenentypen einen unterschiedlichen Flächenanteil aufwiesen. Zusätzlich steuerten sie die Arten von Gitterdefekten auf den verschiedenen Oberflächen. So erzeugten sie Partikel, die bei Bestrahlung mit Licht bevorzugt negativ geladene Elektronen auf den {001}-Ebenen und positiv geladene Löcher auf den {111}-Ebenen ansammelten. Das wiesen die Wissenschaftler mit einer speziellen Technik nach, der Oberflächen-Photostress-Mikroskopie. In den Kristallpartikeln bildeten sich an den Grenzflächen zwischen den beiden Ebenentypen elektrische Felder aus. Diese sind bei einer Anregung durch Licht der Schlüssel zur Trennung von Elektronen und Löchern im Photokatalysator.

Bei ihren Messungen verfolgten die Wissenschaftler die Veränderungen der Menge von Elektronen auf den einzelnen Ebenen außerdem zeitlich höchst genau. Die dazu verwendete Technik heißt zeitaufgelöste Photoemissions-Elektronenmikroskopie. Die Autoren beobachteten nach der Lichteinstrahlung einen überraschend schnellen Elektronentransfer von den {111}- zu den {001}-Ebenen. Er fand in weniger als einer Pikosekunde statt (das heißt in nicht einmal  $10^{-12}$  Sekunden). Zum ersten Mal gelang eine solche Untersuchung in einem so kurzen Zeitfenster. Der Befund deutet darauf hin, dass der Elektronentransport durch Imperfektionen im Material des Photokatalysators nur geringfügig beeinträchtigt



NATURE: ASCHAUER, U.: CHARGE TRANSFER OBSERVED IN LIGHT-ACTIVATED CATALYST PARTICLES. NATURE 610, 2022, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## Schnelle Ladungstrennung

Photokatalysatoren können zahlreiche chemische Reaktionen antreiben. Dazu müssen elektrische Ladungen voneinander getrennt und an die Oberflächen gebracht werden. Licht regt negativ geladene Elektronen dazu an, zu einer bestimmten Kristalloberfläche zu wandern, den {001}-Ebenen. Unterdessen sammeln sich positiv geladene Löcher auf den {111}-Ebenen an. Der Prozess läuft in weniger als einer Pikosekunde ab.

wird und dass die Elektronen einen sehr geringen Widerstand erfahren. Im Gegensatz dazu fangen an den Oberflächen vorhandene Defekte die Ladungsträger relativ langsam ein, innerhalb von Mikrosekunden. Das beobachteten die Forscher auf eine andere Weise, mit der »transienten Oberflächen-Photospannungsspektroskopie«. Die Geschwindigkeit der Wasserstoffherzeugung hängt beim hier verwendeten Photokatalysator (Kupferoxid in Gegenwart eines Gold-Cokatalysators) direkt mit dieser Dynamik des Elektronen- und Löchertransfers zusammen, wie die Wissenschaftler nachwiesen.

### Überragend genau

Der experimentelle Ansatz, die Elektronenbewegungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung auf einem einzelnen Partikel nachzuvollziehen, wird das Verständnis der grundlegenden mikroskopischen Mechanismen bei der Photokatalyse verbessern. Insbesondere gewährt er beispiellose Einblicke, wenn man die Akkumulation von Elektronen und Löchern in Bruchteilen von Pikosekunden verfolgen kann. Damit kann man die Prozesse des Ladungstransfers

untersuchen, die unmittelbar nach der Anregung durch Licht ablaufen. Bisher waren Messungen nur im Mikrosekundenbereich oder nach Erreichen eines Gleichgewichts möglich, das heißt, wenn der Ladungstransfer vollendet ist.

Das wird dabei helfen, die Ursachen bestehender Engpässe bei der Weiterentwicklung photokatalytischer Prozesse zu diagnostizieren und zu überprüfen, ob konkrete Veränderungen bei der Herstellung den erwünschten Erfolg bringen. Dazu zählen das gezielte Einbringen von Kristalldefekten, die Beschichtung mit anderen Materialien und die Zugabe von Cokatalysatoren.

Eine derzeitige Einschränkung des Vorgehens besteht darin, dass es auf einer Kombination hochentwickelter und spezialisierter Techniken beruht. Doch sobald die Methoden zu allgemein zugänglichen und routinemäßig eingesetzten Werkzeugen heranreifen, werden sie der Grundlagenforschung wesentlich wertvollere Daten liefern, als derzeit zur Verfügung stehen. Häufig gibt es bisher lediglich Angaben zu den Produktionsraten von Sauerstoff oder Wasserstoff. Die Herangehensweise dürfte sich leicht

auf weitere Arten von Photokatalysatoren übertragen lassen. Sie wird daher Vergleiche unter einer Vielzahl von Materialien ermöglichen und unser Verständnis der mikroskopischen Prozesse vertiefen, die hinter einer guten photokatalytischen Leistung stecken. Solche detaillierten Kenntnisse sind unerlässlich für das Design von Hochleistungskatalysatoren, mit denen die direkte Umwandlung von Sonnenenergie in Treibstoff zu einer wirtschaftlich tragfähigen Technologie werden könnte. ◀

**Ulrich Aschauer** war bis zum Frühjahr 2022 Professor am Departement für Chemie, Biochemie und Pharmazie der Universität Bern und lehrt seit Frühjahr 2023 an der Universität Salzburg.

### QUELLE

**Chen, R. et al.:** Spatiotemporal imaging of charge transfer in photocatalyst particles. *Nature* 610, 2022

### nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
*Nature* 610, S. 263–264, 2022

ARCHÄOLOGIE

# Dürre brachte wohl das Hethiterreich zu Fall

Eine Katastrophe erschütterte vor zirka 3200 Jahren die Reiche der Mittelmeerwelt. Doch was genau geschehen war, darüber rätseln Fachleute noch. Hölzer aus der späten Bronzezeit liefern nun deutliche Hinweise – aufs Jahr genau.

Um 1300 v. Chr. beherrschten die mächtigen Reiche der Hethiter, Assyrer, Ägypter und Mykener den östlichen Mittelmeerraum. Ihre Schriftquellen berichten von einer blühenden und miteinander vernetzten Welt. Ein gutes Jahrhundert später, um das Jahr 1170 v. Chr., befanden sich dieselben Staaten in ersten Schwierigkeiten. Sturt Manning von der Cornell University in Ithaca und weitere Experten haben nun Beweise dafür vorgelegt, dass zu jener Zeit in Zentralanatolien eine schwere Dürre herrschte. Demnach war wohl ein Klimaextrem ein Schlüsselfaktor für den Untergang des Hethiterreichs.

Um 1170 v. Chr. waren die politischen Staatensysteme der Hethiter und Mykener zerfallen, während sich

die Assyrer und Ägypter auf ihre Kerngebiete zurückgezogen hatten. Die Ereignisse markieren das Ende einer geschichtlichen Epoche im Vorderen Orient – der Bronzezeit, die von zirka 3000 bis 1180 v. Chr. angesetzt wird – und sie kennzeichnen den Beginn einer neuen Phase, der Eisenzeit, die sich von ungefähr 1180 bis 330 v. Chr. erstreckte.

Was die Katastrophe am Ende der Bronzezeit auslöste, darüber diskutieren Wissenschaftler intensiv – bislang haben sie verschiedene Ursachen ausgemacht: So hätten sich die Metallverarbeitung und die Kriegstechnologie gewandelt, ferner kam es zu massiven Wanderbewegungen und Einfällen der so genannten Seevölker; es hätte Kriege zwischen den Staaten gegeben, Klimaverände-

rungen, Hungersnöte und Epidemien. Entweder, so die Annahmen, seien die Ereignisse einzeln oder mehrere gleichzeitig aufgetreten. Forscher ziehen daher auch die Idee vom »perfekten Sturm« in Erwägung: Alle Geschehnisse hätten sich zu gleicher Zeit ereignet, was ganze Staatensysteme zusammenkrachen ließ.

Bei alledem sind jedoch noch viele Fragen über den ursprünglichen Auslöser der Katastrophe ungeklärt. Hatte ein Klimawandel zu Hungersnöten und damit zu Kriegen geführt? Bahnten Hunger und Dürre schließlich den Weg für Epidemien und vertrieben Menschen, oder beschleunigte umgekehrt die Migration den Ausbruch von Krankheiten? Die archäologischen Funde vom Ende der

**WÄCHTERLÖWEN** Die Ruinen von Hattuscha, der einstigen Hauptstadt des Hethiterreichs, liegen bei Boğazkale in der Türkei. Um 1180 v. Chr. ging das Reich relativ plötzlich unter.



IRIS KACZMARCZYK / CHROMORANGE / PICTURE ALLIANCE

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (OPENSTREETMAP, CONTRIBUTORS)



**DEM UNTERGANG GEWEIHT** Im 13. Jahrhundert v. Chr. erstreckte sich das Einflussgebiet der Hethiter von der Ägäis bis zum Vansee, vom Schwarzen Meer bis zum Mittelmeer. Mit den Ägyptern kämpften sie um die Vorherrschaft in der Levante. Daneben existierten die mykenischen Fürstentümer in Griechenland und das assyrische Reich in Mesopotamien. Um 1170 v. Chr. waren die Staaten der Mykener und Hethiter verschwunden, die Ägypter und Assyrer konzentrierten sich auf ihre Heimatgebiete.





IRIS KACZMARCZYK / CHROMORANGE / PICTURE ALLIANCE

Bronzezeit lassen sich nicht präzise genug datieren, um die Ereignisse zeitlich exakt einzuordnen. Über die genaue Abfolge oder sogar den jeweiligen Zeitpunkt der Begebenheiten sind wir also im Unklaren.

Die Studie von Manning und seinen Kollegen leistet nun einen entscheidenden Beitrag dazu, dieses Dilemma zu lösen. Denn die Arbeitsgruppe konnte nicht nur ein verheerendes Klimaereignis nachweisen, sondern auch sehr genau dessen Zeitpunkt bestimmen. Die Autoren analysierten Wacholderhölzer der Arten *Juniperus excelsa* und *Juniperus foetidissima*, die an der antiken Stätte von Gordion in der Zentraltürkei ausgegraben wurden.

Das Wissenschaftlerteam untersuchte zwei Merkmale an den Holzfinden, die mit Wasser in Verbindung stehen. Zum einen: Nehmen Bäume weniger Wasser auf, wachsen sie in

der Regel auch langsamer. Sie bilden also schmalere Jahresringe, die demnach auf trockene Zeiten hinweisen. Zum anderen: Die Gruppe um Manning analysierte die Menge an stabilem Kohlenstoffisotop 13 in den Proben. Das ermöglichte ihr, trockenere Klimaphasen zu identifizieren. Auf solche deuten nämlich überdurchschnittlich hohe Werte von  $\delta^{13}\text{C}$  (Delta-C-13) hin – dieses Maß gibt das Verhältnis der beiden natürlich vorkommenden und stabilen Kohlenstoffisotope 13 und 12 an.

Die Studienautoren untersuchten die Proben zudem auf Veränderungen in der Holzstruktur, die sich bei extremer Trockenheit auf zellulärer Ebene ergeben können. Schließlich verglichen sie ihre Daten mit der durchgängigen und jahrgenaugen Sequenz von Jahresringen, die sie an den gordischen Wacholderbäumen ablesen konnten – diese decken ein Zeitfenster von 1775 bis 748 v. Chr. ab. Damit gelang es, etwaige Klimaereignisse sehr genau zu datieren.

### Extreme Dürre am Ende der Bronzezeit

Laut ihren Ergebnissen herrschten zwischen dem 13. und 10. Jahrhundert v. Chr. überdurchschnittlich trockene Bedingungen. Insbesondere in den drei Jahren von 1198 bis 1196 v. Chr. ereignete sich offenbar eine extreme Dürre. Jene Daten fallen genau in die Umbruchphase am

Ende der Bronzezeit und dürften das Hethiterreich unmittelbar betroffen haben.

Ungefähr von 1650 bis 1180 v. Chr. kontrollierten die Hethiter einen Großteil jenes Gebiets, auf dem sich heute die Türkei und Nordsyrien befinden. Dabei blieb die zentralanatolische Hochebene stets ihr Kernland, einschließlich der Hauptstadt Hattuscha, deren Überreste in der Nähe der modernen Ortschaft Boğazkale liegen. Die von den Studienautoren identifizierte dreijährige Dürre könnte einer der Hauptgründe dafür gewesen sein, vielleicht sogar der wichtigste Grund, weshalb die politische Macht der Hethiter endgültig zerfiel.

Wie die Forscher um Manning betonen, handelt es sich bei Zentralanatolien um eine trockene, dürreanfällige Region. Gruppen, die in solchen Landschaften leben, entwickeln Bewältigungsstrategien für Jahre, die wenig Niederschläge bringen. Das belegen die riesigen Getreidesilos, die fester Bestandteil im Gebäudeinventar zentralhethitischer Städte waren, sowie die großen wasserbaulichen Projekte der Hethiter, etwa Staudämme, die vor allem im 13. Jahrhundert v. Chr. errichtet wurden.

Eine Dürre, die länger als zwei Jahre dauert, ist jedoch außergewöhnlich. Nach Ansicht von Manning und seinem Team stellte sie ein gravierendes Ereignis dar, das die Anpassungs- und Widerstandsfähigkeit einer Gemeinschaft leicht überlasten konnte. Obwohl die Forscher zu Recht davon absehen, einen direkten kausalen Zusammenhang zwischen dem Klimaextrem und einem plötzlichen Zusammenbruch des Hethiterreichs herzustellen, habe ihres Erachtens die Dürre von 1198 bis 1196 v. Chr. diese Entwicklung forciert und beschleunigt. Zumal dies bedeutete, dass das hethitische Kernland auf Getreidelieferungen von den Randgebieten des Reichs angewiesen war. Die extreme Trockenphase hätte die Hethiter jedenfalls dazu gezwungen, ihre Umwelt stärker auszubeuten als zuvor – wodurch sie die Ökosysteme nachhaltig schädig-

**HIEROGLYPHEN** Die Inschrift berichtet von siegreichen Kriegen des Hethiterkönigs Suppiluliuma. Offenbar versuchte er, das Reich militärisch zu stabilisieren. Der Text befindet sich in einer Kammer in der Nähe der östlichen Teiche, einem wichtigen, auch kultisch genutzten Wasserreservoir in Hattuscha.



ALAMY / PAUL WILLIAMS, FUNKYFOOD LONDON

ten und schließlich ihre wichtigsten Städte einschließlich Hattuscha aufgeben mussten.

Eines der vielen Rätsel, die Hethitologen noch lösen müssen, lautet nämlich: Warum wurde Hattuscha in den letzten Jahrzehnten, die das Reich noch existierte, verlassen? Die Stadt aufzugeben, scheint sorgfältig geplant worden zu sein. Man hatte alle Amtsgebäude akribisch geleert, was darauf schließen lässt, dass die Königsfamilie an einen anderen Ort übersiedelte. Da es keine archäologischen Zeugnisse dafür gibt, dass die Metropole infolge eines Kriegs oder einer Eroberung geplündert wurde, haben Fachleute verschiedene Gründe für das Geschehen angeführt. Dazu zählen auch klimatische Veränderungen, die Dürren und Hungers-

nöte ausgelöst hätten. Die Thesen gingen bisher aber nur so weit, dass es einen Zusammenhang zwischen günstigen Klimabedingungen zu Beginn des Hethiterreichs und ungünstigen in der Endphase gegeben hätte.

Die Arbeit von Manning und seinen Kollegen ist wegweisend, weil sie endlich einen konkreten Hinweis darauf liefert, warum Hattuscha verlassen wurde. Künftige Forschungen könnten nun klären, ob das extreme Klimaereignis von 1198 bis 1196 v. Chr. lediglich auf Zentralanatolien beschränkt blieb oder ein größeres Phänomen im östlichen Mittelmeerraum darstellte – das würde jenseits der Hethiter Aufschluss über die Katastrophe am Ende der Bronzezeit geben. ◀

**Müge Durusu-Tanrıöver** ist Archäologin an der Temple University in Philadelphia, USA.

## QUELLEN

**De Martino, S.:** The collapse of the Hittite kingdom. In: Gehler, M. (Hg.): The end of empires. Springer, 2022, 81–96

**Manning, S.W. et al.:** Severe multi-year drought coincident with Hittite collapse around 1198–1196 BC. Nature 614, 2023

**Schachner, A.:** Geographical prerequisites versus human behavior. In: De Martino, S. (Hg.): Handbook Hittite empire: Power structures. De Gruyter, 2022, 159–202

## nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
 Nature 614, S. 625–626, 2023

## ZAHLENTHEORIE

# Trio teilt Zahlen in zwei Lager

Wie viele natürliche Zahlen lassen sich als Summe zweier Kubikzahlen darstellen?

► Anfang 2022 waren drei Mathematiker gerade dabei, ein gemeinsames Forschungsprojekt abzuschließen, als zwei von ihnen – unabhängig voneinander – an Covid-19 erkrankten. Die meisten Menschen würden unter solchen Umständen eine Pause einlegen. Aber das dritte Teammitglied, Manjul Bhargava von der Princeton University, hatte anderes im Sinn. Um seine Kollegen Levent Alpöge von der Harvard University und Ari Shnidman von der Hebräischen Universität Jerusalem von ihren Symptomen abzulenken, schlug er vor, ihre wöchentlichen Zoom-Sitzungen auf drei- oder viermal pro Woche zu erhöhen. Die Quarantäne, so erkannten die drei, könnte eine Gelegenheit sein, ungestört zu denken. Es sollte sich lohnen: Das Trio erzielte einen bedeutenden Fortschritt bei einem Problem, das Mathematiker seit Jahrhunderten plagt.

Es betrifft eines der ältesten Fragen der Zahlentheorie: Welche natürlichen Zahlen lassen sich als Summe zweier Kubikzahlen von Brüchen (rationale Kubikzahlen) schreiben? Sechs ergibt sich zum Beispiel aus der Addition  $(\frac{17}{21})^3 + (\frac{37}{21})^3$ . Fachleute vermuten, dass sich etwa die Hälfte aller natürlichen Zahlen auf diese Weise darstellen lässt. Damit gäbe es zwei Lager: jene Werte, die sich als solche Summe ausdrücken lassen, und der Rest, bei denen das nicht möglich ist.

Bisher konnte das allerdings niemand beweisen. Schlimmer noch: Man konnte nicht einmal den Anteil der Zahlen eingrenzen, die eine Summe von zwei rationalen Kubikzahlen sind. Damit hätte das Lager verschwiegend klein oder unendlich groß sein können. Den einzigen Anhaltspunkt bot eines der sieben Millennium-Probleme, deren Lösung

mit einer Million US-Dollar belohnt wird, die so genannte Birch- und Swinnerton-Dyer-Vermutung.

Sollte sich diese als richtig erweisen (wovon die meisten Fachleute ausgehen), sind etwa 59 Prozent aller Zahlen von 1 bis 10 Millionen die Summe zweier rationaler Kubikzahlen. Doch das liefert bestenfalls nur einen Hinweis darauf, wie sich der Rest der natürlichen Zahlen verhalten könnte.

Zu welchem der zwei Lager ein Wert gehört, ist nicht immer einfach herauszufinden. Bisher gibt es keinen allgemeinen Test, der das überprüft. Zwar haben einige Fachleute ausgeklügelte Testverfahren entwickelt, aber jedes davon hat Schwächen: Entweder lässt sich nicht beweisen, dass es immer zu einem Ergebnis führt, oder man kann nicht sicher sein, dass die gelieferte Schlussfolgerung richtig ist.

Die Schwierigkeit, Summen von Kubikzahlen – und kubische Gleichungen allgemein – zu verstehen, »war eine wiederkehrende Peinlichkeit für Zahlentheoretiker«, so Bhargava. Er erhielt 2014 die renommierte Fields-Medaille für seine Arbeit an den Lösungen kubischer Gleichungen, die als elliptische Kurven bekannt sind und breite Anwendung finden. Durch ihre reichhaltige und komplizierte Struktur sind die Kurven in den Mittelpunkt vieler mathematischer Bereiche gerückt – und ermöglichen es unter anderem Kryptografen, leistungsfähige Verschlüsselungen zu entwickeln. Damit sind auch die Summen rationaler Kubikzahlen nicht bloß eine abstrakte Kuriosität, da sie einen Spezialfall elliptischer Kurven darstellen.

Aufbauend auf mehreren Methoden, die Bhargava in den letzten 20 Jahren mit seinen Kollegen zur Untersuchung elliptischer Kurven

entwickelt hat, gelang ihm im Oktober 2022 zusammen mit Alpöge und Shnidman der Durchbruch: Die Mathematiker haben bewiesen, dass sich mindestens  $\frac{2}{21}$  (etwa 9,5 Prozent) und höchstens  $\frac{5}{6}$  (zirka 83 Prozent) aller natürlichen Zahlen als Summe von zwei rationalen Kubikzahlen schreiben lassen.

#### Der Quadrat-Test

Das ist zwar eine große Spanne, aber trotzdem bemerkenswert. Denn im Gegensatz dazu gibt es kaum Werte, die sich aus zwei quadrierten Brüchen zusammensetzen. Zu Beginn des 16. Jahrhunderts hatten die Mathematiker Albert Girard und Pierre de Fermat einen einfachen Test entwickelt, um festzustellen, ob eine Zahl der Addition zweier Quadrate entspricht.

Dafür zerlegt man sie zuerst in ihre Primfaktoren und pickt dann jene Faktoren heraus, die bei einer Divi-

sion durch 4 einen Rest von 3 haben. Wenn deren Exponenten alle gerade sind, lässt sich die Zahl als Summe von zwei quadrierten Brüchen schreiben; andernfalls nicht. Zum Beispiel: 490 hat die Teiler  $2^1 \cdot 5^1 \cdot 7^2$ . Der einzige Faktor, der durch 4 geteilt einen Rest von 3 hat, ist 7 – und 7 hat einen geraden Exponenten. Daher lässt sich 490 als Summe zweier Quadrate darstellen ( $7^2 + 21^2$ ). Die große Mehrheit der natürlichen Zahlen besteht diesen Test nicht. Wenn man zufällig einen Wert auswählt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass er durchfällt, gleich eins. Mathematiker vermuten, dass das auch für die Summe zweier rationaler, mit vier oder fünf potenzierten Zahlen und alle höheren Potenzen gilt. Nur die Drei eröffnet eine Fülle an Möglichkeiten.

Dass Kubikzahlen ungewöhnlich sind, ist nicht neu. So haben Gleichungen mit zwei Variablen, deren höchster Exponent 1 oder 2 ist, meist

# Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS

## Spektrum PLUS-LESEREXKURSION zum Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)

Sie sind herzlich eingeladen, mit uns das DLR in Köln zu besuchen.

Folgende Institute und Einrichtungen werden während der Führung besichtigt:

- Europäisches Astronautenzentrum (ESA)
- Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin (DLR)
- Nutzerzentrum für Weltraumexperimente MUSC (DLR)
- Hochflusssdichte-Sonnenofen (DLR)

Dienstag  
13. Juni 2023  
Köln

Anmeldung und Gratis-Download des Monats:  
**Spektrum.de/plus**



zwei Arten rationaler Lösungen: entweder keine oder unendlich viele. Es lässt sich häufig leicht herausfinden, welcher der beiden Fälle zutrifft. Wenn die Exponenten größer als drei sind, gibt es in der Regel nur eine begrenzte Anzahl von rationalen Ergebnissen.

Bei kubischen Gleichungen ist hingegen alles möglich: Sie können endlich viele, unendlich viele oder gar keine Lösungen haben. Sie enthalten dadurch Phänomene, die in den anderen Bereichen nicht vorkommen – und sind erstaunlich schwer zu ergründen. Es gibt keine allgemein gültige Methode, um die rationalen Lösungen von kubischen Gleichungen zu finden oder auch nur zu zählen. »Selbst mit all der verfügbaren Rechenleistung kann ich höchstwahrscheinlich nicht sagen, wie viele rationale Lösungen es zu einer elliptischen Kurve gibt – vor allem, wenn sie große Koeffizienten besitzt«, sagt Wei Ho, ein ehemaliger Student von Bhargava, der derzeit Gastprofessor am Institute for Advanced Study ist.

Große Werte treten schnell auf, wenn man eine Zahl als Summe zweier rationaler Kubikzahlen ausdrückt: 2803 erfordert beispielsweise zwei Brüche, deren Nenner jeweils aus 40 Ziffern bestehen. »Und wenn wir erst einmal Zahlen in Millionenhöhe betrachten«, so Bhargava, »passen viele der Brüche nicht mehr auf das gesamte Papier dieser Welt.«

## Hochdimensionale Matrizen

Da elliptische Kurven so unvorhersehbar sind, suchen Zahlentheoretiker nach Möglichkeiten, um sie mit einfacheren Objekten zu verknüpfen. Im April 2022, als Alpöge und Shnidman gegen Covid-19 kämpften, fanden sie heraus: Wenn eine Gleichung rationale Lösungen hat, gibt es einen Weg, mindestens eine spezielle  $2 \times 2 \times 2 \times 2$ -Matrix zu bauen – ein vierdimensionales Analogon von zweidimensionalen Matrizen. Sie begannen, zu überlegen, wie sie diese Objekte zählen könnten.

Dazu griff das Team auf zwei Methoden zurück, die seit mehr als

MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE

1	2				6	7	8	9	
	12	13		15	16	17		19	20
	22				26	27	28		30
31		33	34	35		37			
	42	43					48	49	50
51		53	54		56		58		
61	62	63	64	65		67	68	69	70
71	72			75			78	79	
			84	85	86	87		89	90
91	92		94		96	97	98		

**DIE BLAUEN ZAHLEN** lassen sich als Summe von zwei rationalen Kubikzahlen schreiben, die anderen nicht. Mathematikerinnen und Mathematiker vermuten, dass je die Hälfte aller natürlichen Zahlen in diese Lager fällt.

100 Jahren untersucht werden. Bei der ersten geht es darum, Gitterpunkte innerhalb verschiedener geometrischer Formen zu zählen, was auf die geometrische Zahlentheorie zurückgeht. Das Thema hat in den letzten 20 Jahren dank der Arbeit von Bhargava auf dem Gebiet der elliptischen Kurven eine Renaissance erlebt. Die andere Technik, die so genannte Kreismethode, hat ihren Ursprung in der Forschung der Mathematiker Srinivasa Ramanujan und Godfrey Hardy im frühen 20. Jahrhundert. Dabei geht es darum, die Koeffizienten gewisser Zahlenreihen zu nähern. »Das ist die erste große Anwendung, bei der die Kreismethode mit Techniken aus der geometrischen Zahlentheorie kombiniert wird«, so Ho.

Mit den Ansätzen konnte das Trio zeigen, dass mindestens  $\frac{1}{6}$  der natürlichen Zahlen keine  $2 \times 2 \times 2 \times 2$ -Matrix besitzen – und sich somit nicht als Summe zweier rationaler Kubikzahlen schreiben lassen. Das setzt eine obere Grenze: Es können sich höchstens  $\frac{5}{6}$  (83 Prozent) aus zwei rationalen Kubikzahlen zusammensetzen.

Umgekehrt fanden die Mathematiker heraus, dass mindestens  $\frac{5}{12}$  aller Zahlen genau eine passende Matrix besitzen. Allerdings kann man daraus nicht direkt auf eine untere Grenze schließen. Zwar besitzt jede Zahl, die

sich als Summe von zwei rationalen Kubikzahlen schreiben lässt, eine solche Matrix. Der Umkehrschluss gilt aber nicht zwangsläufig.

Alpöge, Bhargava und Shnidman brauchten einen »Umkehrsatz«: etwas, das Informationen über eine kubische Gleichung nutzt, um daraus rationale Lösungen zu konstruieren. Umkehrsätze bilden ein wichtiges Teilgebiet der Theorie elliptischer Kurven. Deshalb wandte sich das Trio an zwei Experten des Bereichs, Ashay Burungale von der University of Texas in Austin und Christopher Skinner von der Princeton University. Die Mathematiker konnten zeigen, dass eine natürliche Zahl, die eine einzige dazugehörige  $2 \times 2 \times 2 \times 2$ -Matrix besitzt, zumindest in manchen Fällen die Summe zweier rationaler Kubikzahlen ist. Ihr Theorem, das einen Teil der Birch- und Swinnerton-Dyer-Vermutung beweist, bildet einen dreiseitigen Anhang in der Veröffentlichung von Alpöge, Bhargava und Shnidman.

Burungale und Skinner konnten ihren Beweis nicht für jeden Wert mit genau einer Matrix führen – sie mussten den Zahlen eine Anforderung auferlegen, was den Anteil von  $\frac{5}{12}$ -Teilmenge (zirka 41 Prozent) auf  $\frac{2}{21}$  (etwa 9,5 Prozent) reduziert hat. Bhargava ist aber optimistisch, dass in absehbarer Zeit auch der Status

der restlichen 31,5 Prozent geklärt wird. Um die ursprüngliche Vermutung (genau die Hälfte aller ganzen Zahlen lässt sich als Summe von zwei rationalen Kubikzahlen schreiben) endgültig zu beweisen, muss man sich jedoch ebenfalls mit jenen Werten befassen, die mehr als eine zugehörige Matrix besitzen. Der Umgang damit wird völlig neue Ideen erfordern, schätzt Bhargava. ◀

**Erica Klarreich** hat in Mathematik promoviert und ist Wissenschaftsjournalistin in Berkeley (Kalifornien).



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Mathematical Trio Advances Centuries-Old Number Theory Problem« 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.

#### QUELLEN

**Alpöge, L. et al.:** Integers expressible as the sum of two rational cubes. ArXiv: 2210.10730, 2022

**Watkins, M.:** Rank distribution in a family of cubic twists. Cambridge University Press, 2010

## GRUNDLAGENFORSCHUNG

# Raupen statt Mäuse

**Tierversuche mit Nagern lassen sich reduzieren, wenn man stattdessen mit Insektenlarven arbeitet. Die Raupen des Tabakswärmers haben sich in der vorklinischen Forschung als geeigneter Ersatz für Ratten und Mäuse erwiesen.**

▶ Medizinische Forschung wäre ohne Tierversuche undenkbar. Ob therapeutische Eingriffe sicher und wirksam sind, müssen Fachleute erst an Tiermodellen klären, bevor sie sie am Menschen anwenden. Kleinsäuger wie Ratten und Mäuse spielen dabei eine bedeutende Rolle: Der Großteil der vorklinischen Forschung arbeitet mit diesen Tieren. Doch dagegen gibt es ethische Einwände, weil Kleinsäuger zu den komplexen Wirbeltieren zählen, uns evolutionär relativ nah stehen und eine artgerechte Haltung bei ihnen schwer umzusetzen ist. Diese Bedenken schlagen sich in

der Förderpraxis von wissenschaftlichen Projekten sowie in der Gesetzgebung nieder. Demnach sollen in vorklinischen Experimenten alle Möglichkeiten ausgeschöpft werden, um die Zahl der Versuchstiere zu reduzieren und Alternativen zu Wirbeltieren zu finden.

Zu den möglichen Ausweichlösungen gehören Insekten. Mein Team und ich zusammen mit nationalen und internationalen Kooperationspartnern haben kürzlich gezeigt: Die Raupen des amerikanischen Tabakswärmers (*Manduca sexta*) stellen ein geeignetes Tiermodell dar, um Mechanismen entzündlicher Darmkrankheiten zu erforschen. Laut unseren Ergebnissen ist es möglich, krankhafte Veränderungen im Ver-

dauungstrakt der Insekten mit bildgebenden Verfahren zu erkennen und zu untersuchen – ganz ähnlich den Diagnoseverfahren, die am Menschen eingesetzt werden. Verglichen mit traditionellen Labortieren wie Ratten oder Mäusen bietet *Manduca sexta* mehrere Vorteile: Versuche mit dieser Insektenart sind ethisch weniger umstritten, schneller und kostengünstiger.

An den Raupen des Tabakswärmers fällt vor allem die Größe auf. Die Tiere werden bis zu zehn Zentimeter lang und daumendick. Im Unterschied zu anderen Insekten erreichen sie etwa die Abmessungen einer kleinen Maus und sind damit groß genug für die medizinische Bildgebung. Entzündliche Veränderungen in

**ÄHNLICH GROSS** Tabakswärmer-Raupen (links) erreichen annähernd die Abmessungen einer Maus.

FRANZHOEFER/IME, ROM WIEGAND



ihrem Darm lassen sich mit Computertomografie (CT), Magnetresonanztomografie (MRT) und Positronen-Emissions-Tomografie (PET) analysieren, wie wir in unseren Studien gezeigt haben. Diese Methoden dienen sonst zur Diagnose entzündlicher Prozesse beim Menschen.

Der Darm einer *M.-sexta*-Raupen zieht sich in gerader Linie durch das Tier. Daher ist es besonders leicht, die Menge an Kontrastmittel zu bestimmen, die sich bei einer Entzündung in die Darmwand einlagert, weil keine Signalüberlagerung durch Darmschlingen auftritt. Das geschä-



## Kontrastmittel und Markierungsstoffe

Kontrastmittel und Markierungsstoffe (»Tracer«) ermöglichen es, Entzündungsherde im menschlichen Körper zu entdecken und zu untersuchen. Die Forscherinnen und Forscher um Anton Windfelder haben gezeigt, dass das auch bei Insekten wie dem Tabakschwärmer funktioniert. Sie spritzen das Kontrastmittel oder den Markierungsstoff in das rückenseitige Hämolympfgefäß von Insektenlarven. Dieses pumpt die so genannte Hämolymphe, das »Blut der Insekten«, durch den Tierkörper und verteilt die injizierte Substanz.

**Wie funktionieren Kontrastmittel?** Entzündet sich ein Gewebe, schwellen seine Zellen meist an und sterben mitunter ab. Außerdem kommt es zum Verlust von Zellverbindungen. Dadurch vergrößern sich die Zellzwischenräume, und einströmendes Kontrastmittel reichert sich vermehrt an. Infolgedessen sendet das erkrankte Gewebe im Magnetresonanz- oder Computertomografen ein stärkeres Signal aus. Bei einer Darmentzündung misst man typischerweise, wie dick die Darmwand ist und welche Intensität das von dort kommende Signal hat.

**Wie funktionieren Markierungsstoffe?** Die Substanz Fluor-desoxyglucose, kurz  $^{18}\text{F}$ FDG, ähnelt chemisch dem Zuckermolekül Glukose, trägt aber an einer bestimmten Stelle statt einer OH-Gruppe ein radioaktives Fluor-Atom ( $^{18}\text{F}$ ). Tierische Zellen nehmen  $^{18}\text{F}$ FDG genauso auf wie normale Glukose. Läuft ihr Stoffwechsel auf Hochtouren – was bei aktiven Immunzellen im Zuge einer Entzündung der Fall ist –, haben sie einen erhöhten Glukosebedarf und schleusen viel  $^{18}\text{F}$ FDG ein. Sie können den Stoff allerdings biochemisch nicht weiter verwerten, weshalb er sich anreichert. Der radioaktive Zerfall des Fluor-18-Atoms setzt Gammastrahlen frei, die sich mit Hilfe des bildgebenden Verfahrens PET (Positronen-Emissions-Tomografie) einfangen und registrieren lassen. Das ermöglicht es, Entzündungsherde im lebenden Organismus zu erkennen und abzubilden – selbst bei Insekten.

digte Gewebe nimmt Kontrastmittel auf ähnliche Weise auf wie der menschliche Organismus. Infolgedessen können wir bei den Insektenlarven die gleichen Parameter messen und auswerten wie bei Personen mit chronisch entzündlichen Darmerkrankungen – beispielsweise die Dicke der Darmwand. Generell gilt: Je mehr Kontrastmittel sich ins Gewebe einlagert, desto stärker ist die Entzündung (siehe Kasten »Kontrastmittel und Markierungsstoffe«). Mit unseren bildgebenden Verfahren können wir mehrere hundert Raupen gleichzeitig untersuchen, wodurch wir in kurzer Zeit sehr viele Daten bekommen. Doch eignen sich Insekten überhaupt prinzipiell als Tiermodelle für menschliche Erkrankungen?

Wichtige Hinweise darauf fand ein Forschungsteam um die Medizinerin Julia-Stefanie Frick im Jahr 2018. Demnach zeigen Schmetterlingsraupen ähnliche molekulare Reaktionen auf Entzündungsprozesse wie Mäuse. Infizieren krank machende *E.-coli*-Bakterien beispielsweise den Verdauungstrakt, aktivieren die Insektenlarven die gleichen oder ähnliche Gene wie Mäuse. Ungefährliche, symbiotische Bakterien dagegen lösen solche Reaktionen nicht aus – weder bei der einen noch bei der anderen Spezies.

Etwa 75 Prozent der Erbfaktoren, die beim Menschen bekanntermaßen mit Krankheiten assoziiert sind, finden sich ebenso bei Insekten. Diese Gene codieren unter anderem für

## IN DIE RÖHRE Tabakschwärmerlarven werden für Untersuchungen in ein MRT-Gerät eingefahren.

Kernbestandteile des Immunsystems, die genetisch stark konserviert sind. Hierzu zählen angeborene Signalkaskaden der Infektionsabwehr. So entsprechen der imd- («immune deficiency») und der Toll-Signalweg bei Insekten dem TNF- («Tumor Necrosis Factor») respektive dem TLR- («Toll-Like Receptor») Pfad bei Säugetieren. Ähnlichkeiten gibt es weiterhin beim Insulin-Signalweg sowie bei entzündungsregulierenden, hormonähnlichen Substanzen wie den Eikosanoiden. Letztere sorgen dafür, dass Insekten und Säuger auf Wirkstoffe wie Glukokortikoide oder Cyclooxygenase-Hemmer ansprechen, die oft in entzündungshemmenden Medikamenten enthalten sind. Zudem ähneln sich bei beiden Tiergruppen bestimm-

te Zellen des angeborenen Immunsystems. So sind die neutrophilen Granulozyten des Menschen mit den Granulozyten von Schmetterlingen vergleichbar. Und sowohl bei Kerbtieren als auch bei Säugern koordinieren Signalstoffe namens Zytokine die Abwehrreaktionen gegen Krankheitserreger – wobei sie hier wie dort ähnliche Prozesse auslösen.

### Gleich und gleich

Die Ähnlichkeiten zwischen Insekten und Säugetieren zeigen sich darüber hinaus in Gewebestrukturen. Das einschichtige Deckgewebe im Mitteldarm der Tabakschwärmer ist mit Zellfortsätzen namens Mikro villi besetzt – genau wie jenes im Verdauungstrakt der Säuger. Das verbessert den Stoffaustausch. Bestimmte Zell-Zell-Verbindungen, die »Tight Junctions« (bei Wirbeltieren) beziehungsweise »Septate Junctions« (bei Insekten), regulieren in beiden Grup-

pen die Durchlässigkeit des Gewebes. Die »peritrophische Matrix« der Insekten, eine gallertartige Schutzschicht aus Chitin und Schleim im Darminneren, entspricht funktionell der Darmschleimschicht der Säugertiere, die unter anderem das Eindringen von Krankheitserregern erschwert. Wegen all dieser Übereinstimmungen eignen sich Tabakschwärmer-Raupen durchaus als Tiermodelle, um neue Wirksubstanzen gegen Darmentzündungen zu testen. Unnötige Versuche mit Mäusen lassen sich so vermeiden.

Forscherinnen und Forscher prüfen Arzneistoffkandidaten zunächst an Zellkulturen. Das ist vergleichsweise einfach und kostengünstig, erlaubt aber nur begrenzte Aussagen darüber, wie sich die Wirkstoffe im komplexen lebenden Organismus verhalten werden. Viele Effekte, die sich im Kulturgefäß beobachten lassen, treten bei Labor-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

JAHRGANG 2022

— CD-ROM —

Die **Spektrum**-CD-ROM enthält den kompletten Inhalt (inklusive Bildern) des Jahrgangs 2022 von **Spektrum** der Wissenschaft als PDF-Version. Die Artikel sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken.

Zur besseren Nutzung Ihres Heftarchivs finden Sie auf der CD zusätzlich das Register von 1978 bis 2022 als PDF-Datei.

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

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



## Das Protein Duox und seine Rolle bei Entzündungen

Viele Eiweißstoffe, die an Erkrankungen des Menschen mitwirken, kommen ebenso bei Insekten wie dem Tabakswärmer vor. Ein Beispiel hierfür ist das Protein Duox. Es ist bei beiden Spezies im Darm zu finden und gehört zu den Bestandteilen des angeborenen Immunsystems. Droht eine Infektion mit krank machenden Bakterien, erkennt die Immunabwehr das und aktiviert Duox. Das Protein kurbelt die Produktion reaktionsfreudiger Sauerstoffverbindungen an, zu denen beispielsweise die hypochlorige Säure gehört. Diese chemisch aggressiven Stoffe töten bakterielle Erreger wirksam ab. Allerdings greifen sie auch den eigenen Organismus an und können dadurch Entzündungen auslösen. Weil das bei Menschen und Tabakswärmern in ähnlicher Weise geschieht, lassen sich die Insekten als Tiermodelle nutzen, um Entzündungsmechanismen besser zu verstehen und neue Therapieansätze zu testen.

mäusen nicht auf. Deshalb gelingt es oft nicht, Arzneistoffwirkungen aus der Petrischale in Versuchen mit Nagern zu reproduzieren. Genau hier erweisen sich die Tabakswärmer als hilfreich: Sie erlauben Tierversuche, ohne dafür gleich komplexe Säuger heranziehen zu müssen. Nur falls sich ein in der Petrischale nachgewiesener Effekt am Insektenmodell bestätigt, würden Experimente mit Nagern folgen – andernfalls nicht. Das spart Ressourcen und ist ethisch weniger umstritten.

Das Tabakswärmer-Insektenmodell lässt sich beispielsweise nutzen, um neue antibiotische Wirkstoffe zu testen. Wir experimentieren hierfür mit Raupen, die mit Bakterien gefüttert wurden, welche Darmentzündungen auslösen. Unsere antibiotische Testsubstanz dämmte die Entzündungen ein, und zwar umso stärker, je höher konzentriert wir sie einsetzten. Mit bildgebenden Verfahren können wir genau feststellen, wie ausgeprägt eine solche Darmentzündung ist (siehe Kasten »Kontrastmittel und Markierungsstoffe«). Das wiederum macht es möglich, Bakterien nach dem Ausmaß ihrer krank machenden Wirkung einzuordnen.

Weiterhin erforschen wir an den Raupen die allgemeinen Mechanismen von Darmentzündungen. So vermuten Fachleute schon lange, dass chronisch-entzündliche Darm-erkrankungen wie Morbus Crohn und Colitis ulcerosa von reaktionsfreudigen Sauerstoffverbindungen mitverursacht werden. Im Verdauungstrakt wirkt unter anderem das Protein Duox (für »Duale Oxidase«) daran mit, diese chemisch aggressiven Moleküle zu erzeugen. Das Protein zeigt sowohl bei Menschen als auch bei Insekten, die an Darmentzündungen leiden, eine erhöhte Betriebsamkeit. Aktivieren wir es bei gesunden Larven, prägen sie die Entzündungsreaktion ebenfalls aus, was wir mit bildgebenden Verfahren beobachten können. Behandeln wir die so manipulierten Raupen mit Glukokortikoiden, bildet sich die Entzündung zurück, ähnlich wie bei menschlichen Patienten. Substanzen, die Duox hemmen, haben die gleiche Wirkung. *Manduca sexta* kann folglich dazu dienen, Säugetiermodelle zu ersetzen – zumindest in dem hier untersuchten Zusammenhang. Nun müssen weitere Studien folgen, die aufklären, welche genaue Rolle Duox

bei chronisch entzündlichen Darm-erkrankungen spielt.

Natürlich ist das Insektenmodell in seinen möglichen Anwendungen begrenzt. Tabakswärmer unterscheiden sich von Säugern vor allem darin, dass ihnen die B- und T-Zell-basierte adaptive Immunantwort fehlt. Außerdem haben sie im Gegensatz zu diesen ein offenes Kreislaufsystem, atmen über Gewebekanäle (Tracheen) und besitzen andere Mechanismen, um Glukose durch den Organismus zu transportieren. Ungeachtet dessen gibt es überraschend viele Gemeinsamkeiten zwischen beiden Gruppen, vermittelt von evolutionär alten, hochkonservierten Genen. Genau diese Erbanlagen sind überproportional oft mit Erkrankungen assoziiert. Deshalb eignen sich Insektenmodelle aus unserer Sicht hervorragend dafür, das Verständnis menschlicher Krankheiten zu vertiefen und Labormäuse zumindest in bestimmten Experimenten zu ersetzen. ◀

**Anton Windfelder** arbeitet als Wissenschaftler im Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie in Gießen sowie am Labor für Experimentelle Radiologie der Justus-Liebig-Universität Gießen.

### QUELLEN

**Lange, A. et al.:** *Galleria mellonella*: A novel invertebrate model to distinguish intestinal symbionts from pathogens. *Frontiers in immunology* 9, 2018

**Reiter, L. T. et al.:** A systematic analysis of human disease-associated gene sequences in *Drosophila melanogaster*. *Genome research* 11, 2001

**Windfelder, A. G. et al.:** High-throughput screening of caterpillars as a platform to study host-microbe interactions and enteric immunity. *Nature Communications* 13, 2022

### VIDEOTIPP

»Raupe hilft bei chronischen Darm-erkrankungen«

[www.youtube.com/watch?v=bBXMxpFCIqs&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=bBXMxpFCIqs&t=2s)

*Ein Beitrag der »Hessenschau« über Tabakswärmerlarven als Tiermodelle*



# Krieg der Automaten

Über dem modernen Schlachtfeld kreisen Schwärme unbemannter Flugkörper. Dürfen sie demnächst selbstständig über Leben und Tod entscheiden?

» [spektrum.de/artikel/2120751](https://spektrum.de/artikel/2120751)

Der Überfall Russlands auf die Ukraine im Februar 2022 fing an wie eine historische Episode aus dem Zweiten Weltkrieg. Ein Bombardement der ukrainischen Militärflughäfen sollte dem Angreifer die absolute Lufthoheit verschaffen, damit seine Panzerverbände ungehindert vordringen konnten. Die fühlten sich so sicher, dass sie im Gänsemarsch auf den ukrainischen Straßen ins Land fuhren. Doch dann traf die Geschichtsstunde auf das Computerzeitalter: Mit ein paar Drohnen verwandelten die Verteidiger den Vormarsch in einen gigantischen Stau.

Seither sind die Kampfhandlungen zu einem Zermürbungskrieg geronnen, der die Fronten träge hin und her verschiebt. Wie konnte es zu dem militärischen Patt zwischen David und Goliath kommen?

In modernen Konflikten geben oft die »Waffen des kleinen Mannes« den Ausschlag. Im Ukraine-Krieg sind das ferngesteuerte Flugkörper. Inzwischen setzen beide Seiten in großem Stil Drohnen ein. Damit bietet die Ukraine ein Experimentierfeld für unbemannte Waffenträger.

So ein Gerät muss nicht viel kosten. Ukrainer bestücken manchmal handelsübliche Multikopter mit Handgranaten, um diese über russischen Schützengräben abzuwerfen. Russland setzt iranische Kamikaze-Drohnen ein, die über feindlichem Gebiet in Wartestellung kreisen, bis sie sich auf ein Funksignal hin ins Ziel stürzen. Solche Wegwerfwaffen sind billiger als die – dafür wiederverwendbaren – Drohnen aus der Türkei, die auf ukrainischer Seite zum Einsatz kommen.

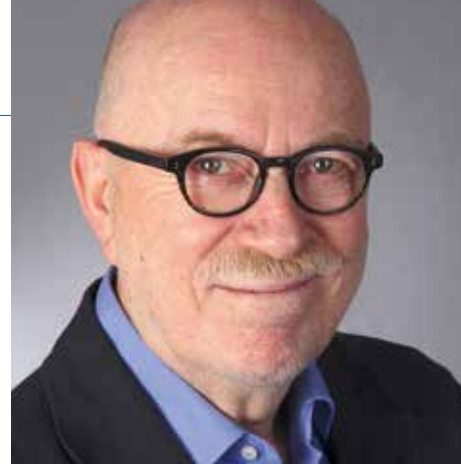
Das Wettrüsten mit ferngesteuerten Minibombern schafft geradezu automatisch den Anreiz, sie mit künstlicher Intelligenz auszustatten. Eine herkömmliche, sozusagen dumme Drohne verhält sich im Einsatz auf dem Schlachtfeld schwerfällig und ist verwundbar. Da sie immerfort auf die Lenksignale eines weit entfernt sitzenden Piloten angewiesen bleibt, kann der Feind die Verbindung mit Störsendern lahmlegen – die Drohne geht verloren. Falls sie unterwegs in den Beschuss gegnerischer Flugabwehr gerät, vermag sie nur so

schnell zu reagieren wie der sie steuernde Mensch. Und dieser muss, wenn sie sich endlich dem Zielgebiet nähert, an seinem verpixelten Bildschirm sekunden-schnell entscheiden, ob er das Objekt im Fadenkreuz zerstören soll oder nicht. Hat er gegnerische Streitkräfte vor sich oder eigene? Ist eine Gruppe von Zivilpersonen unterwegs?

Rein militärtechnisch betrachtet spricht alles dafür, Drohnen mit einem Maximum an autonomer Intelligenz auszustatten. Die Sache hat nur einen gewaltigen Haken: Damit wird das extremste moralische Dilemma, die Entscheidung über Leben und Tod anderer Menschen, komplett an Maschinen delegiert. Darauf weist der Computerwissenschaftler Stuart Russell von der University of California in Berkeley mit Nachdruck hin (*Nature* 614, S. 620–623, 2023).

Seit 2014 wird im Rahmen der Genfer Konvention über bestimmte konventionelle Waffen (Convention on Certain Conventional Weapons, CCW) über eine Beschränkung tödlicher autonomer Waffen verhandelt, allerdings bisher ohne Ergebnis. Große Militärmächte wie die USA und Russland argumentieren technisch: Die Automatisierung würde die Zielerkennung verbessern und somit Kollateralschäden mindern.

Die Verhandlungspartner können sich nicht einmal darauf einigen, was sie unter Autonomie verstehen wollen. Stuart Russell nennt es absurd, dass die deutsche Seite erklärt, eine Waffe sei erst autonom, wenn sie die Fähigkeit besitze, »zu lernen und Selbstbewusstsein zu entwickeln«. Damit wird die philosophische Streitfrage, ob eine Maschine so etwas wie Bewusstsein haben kann, vorgeschoben, um die Rüstungsbeschränkung bereits existierender autonomer und lernfähiger Waffensysteme auf den Sankt-Nimmerleins-Tag zu verschieben.



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

BIOLUMINESZENZ

# Das Geheimnis des Meeresleuchtens

**BLAUE WELLEN**  
An der kalifornischen  
Küste bei San Diego  
erzeugen biolumines-  
zierende Bakterien ein  
gespenstisches Licht.

Jahrhundertlang rätselten Seefahrer über geisterhafte Leuchterscheinungen, die aus der Tiefe des Ozeans zu kommen scheinen. Mit Satellitenaufnahmen versuchen Wissenschaftler, solche »Milchmeere« gezielt aufzuspüren, um sie vor Ort genauer zu untersuchen.

» [spektrum.de/artikel/2120754](https://spektrum.de/artikel/2120754)



**Michelle Nijhuis** ist Biologin und mehrfach preisgekrönte Wissenschaftsjournalistin. Ihre Themenschwerpunkte liegen im Bereich Naturschutz und Klimawandel. Sie lebt in White Salmon (US-Bundesstaat Washington).

## SERIE OZEANE

TEIL 1: MÄRZ 2023

### Heilkraft aus dem Meer

Stephanie Stone

TEIL 2: APRIL 2023

### Der neue Klang der Ozeane

Tim Kalvelage

► TEIL 3: MAI 2023

### Das Geheimnis des Meeresleuchtens

Michelle Nijhuis

### Verborgene Wanderungen

Katherine Harmon Courage  
([spektrum.de/artikel/2117967](https://spektrum.de/artikel/2117967))

TEIL 4: JUNI 2023

### Extremwetter in den Ozeanen

Thomas Frölicher

► An 30. Januar 1864 geriet das Schlachtschiff »Alabama« in eine Meereszone, die der Kapitän als einen »bemerkenswerten Fleck« beschrieb. Der auf südwestlichem Kurs am Horn von Afrika segelnde Schoner gehörte zur Flotte der Konföderierten, die während des Amerikanischen Bürgerkriegs auf den Weltmeeren unterwegs war, um die Nordstaaten mit Überfällen auf ihre Handelsschiffe zu schwächen. Selbst den kampferprobten Seemännern um Kommandant Raphael Semmes (1809–1877) erschien der Anblick des Meeres unheimlich. »Gegen 8 Uhr abends kamen wir bei mondloser Nacht und sternklarem Himmel plötzlich aus dem tiefblauen Wasser in eine Zone, die so weiß war, dass ich erschrak«, heißt es in Semmes' Memoiren.

Zunächst dachte er, das anhaltende blasse Leuchten sei ein unterseeischer Bergrücken. Doch das Lot, das die Schiffsbesatzung über das Dollbord ins Wasser fallen ließ, sank 200 Meter tief, ohne auf Grund zu stoßen. »Am Horizont sahen wir einen Lichtschimmer wie von einer fernen Beleuchtung, während sich über uns ein pechschwarzer Himmel spannte«, schrieb Semmes. »Das ganze Antlitz der Natur schien sich verändert zu haben, und mit ein wenig Fantasie hätte man die »Alabama« für ein Geisterschiff halten können, das vom blassen, unwirklichen Schein eines gespenstischen Meeres erleuchtet wurde.« Mehrere Stunden lang durchquerte die »Alabama« die unheimliche Zone, bis diese schließlich ebenso abrupt endete, wie sie begonnen hatte.

Semmes' Beschreibung gilt als eines der frühesten zuverlässigen Zeugnisse dieses Phänomens – ein wertvoller, wenn auch ungeplanter Beitrag zur Meeresforschung. Nach dem Abgleich von Dutzenden historischen Berichten mit aktuellen Satellitendaten stehen Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen nun kurz davor, eines der hartnäckigsten Rätsel der Ozeane zu lösen: großflächige, flüchtige Lichterscheinungen von lebenden Organismen.

## AUF EINEN BLICK

### Rätselfhafte Biolumineszenz

- 1 Im Freiwasser der Ozeane verursachen Bakterien großflächige Leuchterscheinungen. Die Hintergründe dieser »Milchmeere« sind kaum erforscht.
- 2 Etliche marine Organismen setzen Licht ein, um Geschlechtspartner oder Beute anzulocken. Diese Biolumineszenz beruht oft auf symbiontischen Bakterien in speziellen Organen der Tiere.
- 3 Ein großer Teil der im freien Wasser schwimmenden sowie am Meeresgrund lebenden Tiere ist zur Biolumineszenz fähig.

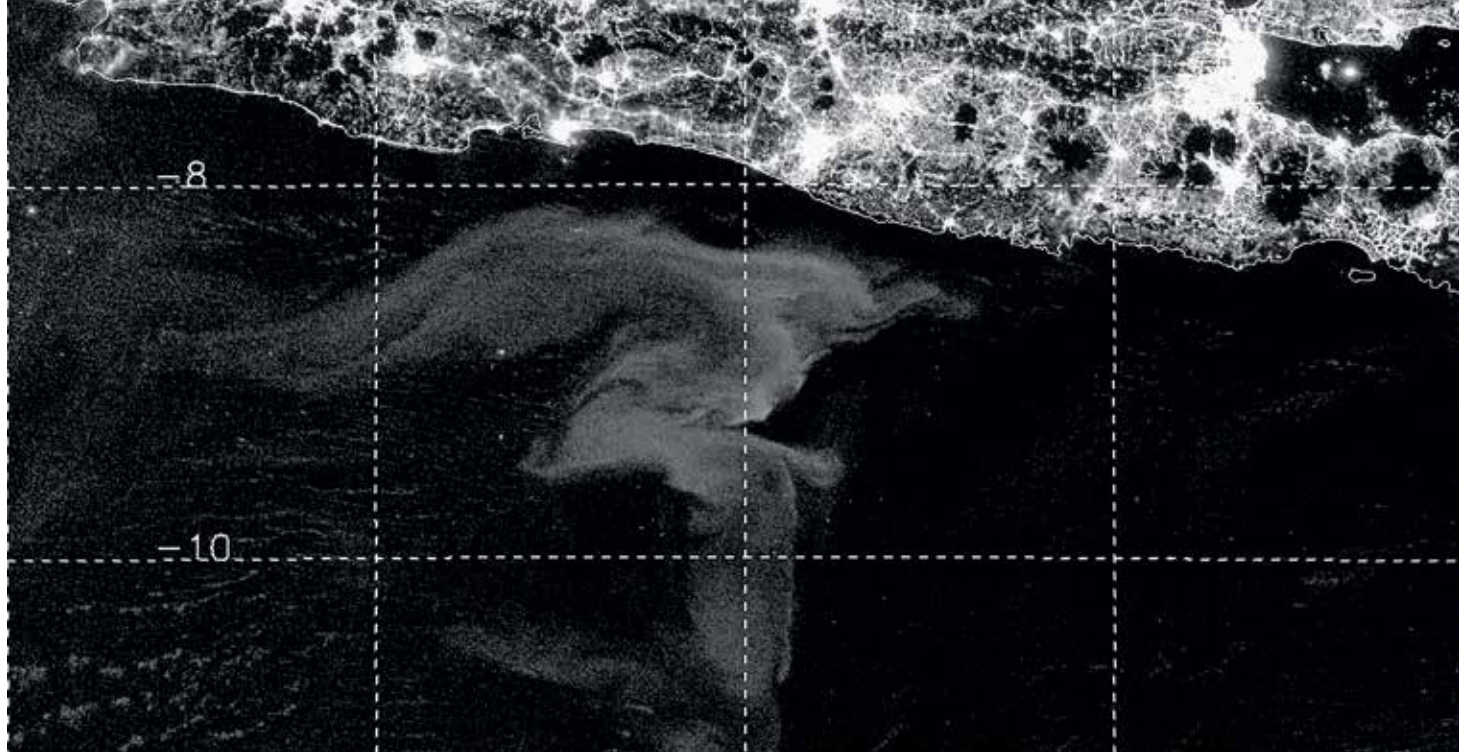
Das Licht, das Glühwürmchen, einige Pilzarten sowie verschiedenste Meerestiere aussenden, wird als Biolumineszenz bezeichnet. Obwohl es zu den ältesten Themen wissenschaftlicher Betrachtungen zählt und sogar in die Poesie etlicher Kulturen des Altertums Einzug hielt, gilt es nach wie vor als schwer zu erkunden. Im 3. Jahrhundert v. Chr. beobachtete Aristoteles (384–322 v. Chr.) blaue Blitze, wenn er mit einem Stab auf die Meeresoberfläche schlug. 300 Jahre später berichtete Plinius der Ältere (etwa 23–79 n. Chr.) über leuchtende Mollusken, Quallen und Pilze; und im Schwarzwald, so schrieb er, lebten Gerüchten zufolge leuchtende Vögel (was sich allerdings nie bestätigt hat). Um 1370 nahm der arabische Naturhistoriker Muhammad ibn Musa al-Damiri (1341–1405) lumineszierende Insekten in sein zoologisches Wörterbuch auf. 1492 beobachtete Christoph Kolumbus (etwa 1451–1506) auf seiner schicksalhaften Reise über den Atlantik bei den Bahamas einen hellen Schimmer im Meer. Vermutlich stammte das Licht von biolumineszierenden Meerestieren der Gattung *Odontosyllis*, die regelmäßig in großen Schwärmen zur Wasseroberfläche aufsteigen, um hier ihren kreisförmigen Paarungstanz aufzuführen.

### Riesige »Milchmeere«

Nach jahrhundertlangem Rätselraten fanden schließlich Ende des 19. Jahrhunderts Wissenschaftler heraus, dass Biolumineszenz bei einer enzymatisch katalysierten Oxidationsreaktion in Tier- und Pflanzenzellen entsteht. Grundlegende Fragen blieben aber offen: Was veranlasst die verschiedenen Organismen dazu, Licht zu erzeugen, und welchem Zweck dient es?

Bei den meisten Beobachtungen von Biolumineszenz an Land und auf See handelt es sich um blau-grüne Blitze oder Lichtschimmer, die manchmal durch Störungen in der Umgebung ausgelöst werden, so wie es etwa Aristoteles beschrieben hat. Seefahrer wie Kapitän Semmes schilderten jedoch ein ganz anderes Phänomen: Das Meerwasser schimmerte gleichmäßig weiß, mitunter über tausende Quadratkilometer. Dieses »Milchmeer« war so merkwürdig und trat so selten auf, dass die Anekdoten darüber weithin als Märchen galten – kaum glaubwürdiger als die Erzählungen über Meerjungfrauen.

Herman Melville (1819–1891) interpretierte das Meeresleuchten in seinem 1851 erschienenen Epos »Moby Dick« als böses Omen: Er schilderte die »stille, aber gläubische Furcht«, die einen Seemann ergriff, der in ein »mitternächtliches Meer von milchiger Weiße« eintauchte, als ob »Schwärme gekämmter weißer Bären um ihn herum schwimmen würden«. In dem fast zwei Jahrzehnte später publizierten Roman »20 000 Meilen unter dem Meer« von Jules Verne (1828–1905) zeigt sich der fiktive U-Boot-Passagier Pierre Aronnax hingegen wenig über die milchige See im Golf von Bengalen beunruhigt und erklärt nüchtern seinem mitreisenden Diener Conseil: »Das Weiße, das dich so verblüfft, rührt nur von Myriaden Infusionstierchen her, einer Art kleiner, leuchtender Würmer, die gallertartig und farblos aussehen.«



**BLICK AUS DEM ALL** Im August 2019 machte eine hochsensitive Satellitenkamera ein »Milchmeer« aus, das sich südlich von Java über eine Fläche von mehr als 100 000 Quadratkilometern erstreckte. Das Phänomen war 45 Tage zu sehen.

Vernes Romanheld war auf der richtigen Fährte, doch es sollte noch mehr als ein Jahrhundert vergehen, bis die Sciencefiction von der Wissenschaft eingeholt wurde. Im Juli 1985 stieß ein Forschungsschiff der US-amerikanischen Marine vor der Arabischen Halbinsel auf eine milchig erleuchtete Meereszone. Die Wissenschaftler an Bord führten gerade eine breit angelegte Studie zur marinen Biolumineszenz durch. Sie waren also für diesen Glücksfall bestens gerüstet und sammelten rasch Wasserproben zur weiteren Analyse. Darin fanden sie neben den erwarteten Dinoflagellaten, Ruderfußkrebse und anderen Planktonorganismen auch die biolumineszierende Bakterienspezies *Vibrio harveyi*. Wie die Forscher vermuteten, entsteht das milchige Meeresleuchten, wenn Algenkolonien an der Wasseroberfläche blühen und dann absterben. Sobald die toten Algen zerfallen, setzen sie fetthaltige Nährstoffe frei – ein gefundenes Fressen für die Bakterien, die sich daraufhin rasend vermehren und im Wasser eine so hohe Zelldichte erreichen, dass sie ein kontinuierliches Licht erzeugen.

Endlich war das Milchmeer als wissenschaftlich anerkanntes Phänomen mit einer biologisch plausiblen Ursache etabliert. Um zu verstehen, wo, wann und unter welchen Bedingungen es auftritt, brauchten die Fachleute allerdings mehr Daten, als der Zufall sie lieferte.

Für die Kriegsmarine stellt Biolumineszenz ein Sicherheitsrisiko dar, denn in einer lichterfüllten Meereszone lässt sich ein U-Boot womöglich gut ausmachen und wird damit zu einem leichten Angriffsziel. Daher fragte sich Anfang der 2000er Jahre der Atmosphärenforscher

Steven Miller, der damals am US-Marine-Forschungsinstitut in Monterey arbeitete, ob sich das Meeresleuchten aus dem All beobachten ließe. Die einzigen Satelliten, deren Sensoren zu jener Zeit in der Lage waren, sichtbares Licht bei Nacht zu beobachten, waren die des OLS-Systems (Operational Line Scan) der US Air Force. Miller wusste, dass die meisten Biolumineszenzphänomene viel zu kleinräumig auftreten, als dass sie von den Satelliten registriert werden könnten. Aus einer Laune heraus durchstöberte er daher das Internet nach Hinweisen auf großflächige Ereignisse. Tatsächlich stieß er auf eine Beschreibung von Milchmeeren auf der Website von »Science Frontiers«, einem eigentümlichen Katalog des »Ungewöhnlichen und Unerklärlichen«, den der Physiker William Corliss (1926–2011) initiiert hatte.

### Augenzeugenberichte

Millers Neugierde war geweckt. Er begann, Augenzeugenberichte zu sammeln. Darunter befand sich eine recht aktuelle Schilderung vom britischen Handelsschiff »Lima«, das am 25. Januar 1995 am Horn von Afrika eine milchig leuchtende Meereszone passiert hatte. »Die Biolumineszenz bedeckte das gesamte Seegebiet von Horizont zu Horizont«, heißt es im Logbuch, »und es schien, als fahre das Schiff über ein Schneefeld oder glitt über den Wolken.«

Als Miller die OLS-Aufnahmen von der Position der »Lima« an jenem Tag anschaute, bemerkte er zunächst nichts Ungewöhnliches. Doch als er näher heranzoomte, erkannte er einen schwachen, kommaförmigen Fleck. »Er sah aus wie ein Fingerabdruck auf dem Monitor, aber als ich das Bild verschob, bewegte er sich mit«, erinnert sich Miller. Dann stellte er fest, dass die Ränder des Flecks mit den im Logbuch verzeichneten Koordinaten des Schiffs übereinstimmten, als es in die 15 000 Quadratkilometer große leuchtende Zone hinein- und wieder herausgefah-

## Leuchtende Beispiele

Tiefseebewohner produzieren ein erstaunliches Spektrum verschiedener Formen von Biolumineszenz, um miteinander zu kommunizieren, Partner oder Beute anzulocken oder Räuber abzuschrecken. Von links oben: ein Leuchtkalmar (*Vatasenia scintillans*) **1**, ein zur Familie der Borstenmäuler zählender Tiefseefisch (*Gonostoma elongatum*) **2**, eine Rippenqualle (*Callianira antarctica*) **3**, eine Leuchtqualle (*Pelagia noctiluca*) **4**, eine weitere Rippenqualle (*Beroe abyssicola*) **5** sowie eine Meerwalnuss (*Mnemiopsis leidyi*) **6**, die ebenfalls zum Stamm der Rippenquallen gehört.

ren war. Auf den OLS-Bildern der Tage vor und nach den Einträgen fand Miller denselben Fleck, der sich im Einklang mit den örtlichen Meeresströmungen gegen den Uhrzeigersinn drehte. »Okay«, dachte Miller, »wir können also wirklich Biolumineszenz vom Weltraum aus sehen.«

Daraufhin kontaktierte er den Meeresbiologen Steven Haddock vom nahe gelegenen Monterey Bay Aquarium Research Institute. Wie Miller hatte Haddock selbst noch nie ein Milchmeer mit eigenen Augen gesehen – er kannte das Phänomen vor allem von seinem einstigen Betreuer Peter Herring, der Hunderte von Beschreibungen solcher Ereignisse bis zurück zu der von Kapitän Semmes katalogisiert hatte. Haddock beschäftigt sich in erster Linie mit der Biolumineszenz von Quallen und hat sich darauf spezialisiert, leuchtende Organismen mit Hilfe von bemannten oder ferngesteuerten Tauchbooten zu erforschen. Von da an arbeiteten Haddock und Miller zusammen.

Millers Fund auf den OLS-Bildern von 1995 war schieres Glück – ein Produkt seiner Hartnäckigkeit und einer zufällig passenden Satellitenposition. Jetzt hoffte er auf eine systematische Erfassung der leuchtenden Meereszonen durch den DNB-Sensor (Day/Night Band), ein neues Instrument, das schwaches Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich detektieren soll. Der 2011 eingeführte Sensor steckt inzwischen in zwei Satelliten, die in mehr als 800 Kilometer Höhe die Erde umkreisen. Über 100-mal empfindlicher als das OLS-System, kann er die Schimmer eines Milchmeers problemlos aufspüren. Allerdings erfasst er auch das schwache Leuchten des Nachthimmels, das bei der Absorption von ultraviolettem Licht in der oberen Atmosphäre entsteht und von der Bewölkung teilweise gestreut wird. »Wolken gibt es überall«, erklärt Miller. »Das Himmelsleuchten streut nach oben und bildet manchmal einen sehr diffusen, breitflächigen Lichtschleier.« Um echte Biolumineszenz von diesem störenden Phänomen unterscheiden zu können, fügt er hinzu,



ALAMY / ADISHA PRAMOD

AGENCE NATURE / NHPA/PHOTOSHOT / PICTURE ALLIANCE

»haben wir jahrelang stark verrauschte Bilder angeschaut«.

Zahlreiche Berichte von Seefahrern deuten darauf hin, dass ein Milchmeer am häufigsten im Winter und im Sommer auftritt. Besonders oft taucht es im nordwestlichen Indischen Ozean auf, wo es die Besatzungen der »Alabama« und der »Lima« gesichtet hatten, sowie bei Indonesien, vor allem in der Nähe der Insel Java oder in der Bandasee. Miller grenzte somit seine Suche auf diese Jahreszeiten und Regionen ein und analysierte DNB-Daten, die in mondlosen Nächten der Jahre 2012 bis 2021 gesammelt worden waren. Dabei identifizierte er schließlich ein Dutzend Ereignisse, die tagsüber verschwanden, über mehrere Nächte mit den Meeresströmungen weiterdrifteten und nicht vom Streulicht der Wolken stammten. Ein solches Ereignis aus dem Jahr 2019 südlich von Java blieb wenigstens 45 Nächte lang sichtbar und bedeckte mehr als 100 000 Quadratkilometer – ein Gebiet so groß wie Bayern und Baden-Württemberg zusammen.

Die Beständigkeit dieses Meeresleuchtens über mehrere Wochen hinweg lässt hoffen, dass Forscher dank der DNB-Daten rechtzeitig informiert werden können, um das Phänomen bei Tauchgängen in den entsprechenden Gebieten genauer vor Ort zu studieren. »Messungen aus dem Weltraum haben nur eine begrenzte Aussagekraft«, betont Miller. »Wir sehen nicht ins Wasser hinein; die vertikale Struktur des Meeresleuchtens bleibt unklar; und wir können natürlich auch keine Proben der beteiligten Organismen nehmen oder die chemischen Prozesse analysieren. Dazu muss man einfach mittendrin sein.«



3



4



5



6

Während Miller auf die Gelegenheit wartet, endlich ein Milchmeer unmittelbar zu erleben, baut er seinen Katalog dokumentierter Sichtungen weiter aus. Eine stammt von Sam Keck Scott, der im Sommer 2010 mit einem restaurierten Zweimaster von Malta nach Singapur quer durch das Arabische Meer segelte. An einem Juliabend, als Scott seine Wache begann, sah er ein seltsames Leuchten in der Luft. Nach wenigen Minuten fiel ihm auf, dass er trotz des pechschwarzen Himmels die Segel und den Rumpf des Schiffs klar erkennen konnte – der gesamte Ozean schien von innen zu glühen. Vier Stunden lang glitten Scott und seine Kameraden durch die milchige See, um sie schließlich urplötzlich wieder zu verlassen. »Wir wussten, dass es sich um irgendeine Art von Biolumineszenz handelte«, erinnert sich Scott, »aber es war so heftig, wie ich es noch nie zuvor gesehen hatte.«

Auch ohne es selbst erlebt zu haben, stellten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verschiedene Hypothesen über den Ursprung des Milchmeers auf. Die Forscher der Marineexpedition von 1985 vermuteten, dass sich die nachgewiesenen biolumineszierenden Bakterien um eine Algenblüte herum angesammelt hatten. Andere führten das gleichmäßige Leuchten auf »Quorum sensing« zurück, also auf die Fähigkeit von Mikroorganismen, mittels chemischer Signale miteinander zu kommunizieren: Sobald ihre Zelldichte im Wasser hoch genug ist, um gemeinsam eine wahrnehmbare Menge Licht zu erzeugen, leuchten sie ununterbrochen.

Doch wozu das Ganze? Biologen vermuten, dass die Biolumineszenz mancher Meeresorganismen dazu dient, Beutetiere oder Partner anzulocken, oder dass es sich um ein Alarmsignal handelt, das bei einem Räuberangriff aufleuchtet – und damit die Fressfeinde ihrer Fressfeinde ködert. Hinter dem Leuchten beim »Quorum sensing« der Bakterien könnte dagegen eine andere Einladung stecken: Wenn einer dichten Bakterienkolonie im offenen Wasser die Nahrung ausgeht, könnte sie leuchten und so Fische aus der näheren Umgebung herbeirufen. Diese sollten die Mikroben verzehren, so dass sie in den Eingeweiden der Fische überleben.

### Strömung und Temperaturgradient

Die über ein Jahrzehnt hinweg gesammelten DNB-Daten passen nicht ganz zur Hypothese, wonach das Meeresleuchten am häufigsten im Winter und Spätsommer vorkommt. Vielmehr scheint es im nordwestlichen Indischen Ozean vor allem dann aufzutreten, wenn Winter- und Sommermonsun Phytoplanktonblüten auslösen, indem sie kaltes, nährstoffreiches Wasser aus der Tiefe an die Meeresoberfläche bringen. Weiter östlich aber könnte der Rhythmus des Meeresleuchtens durch den Indischen-Ozean-Dipol bedingt sein – ein El-Niño-ähnliches Muster von Temperaturschwankungen an der Meeresoberfläche, das einhergeht mit kühler, trockener Witterung und starken Winden im östlichen Indischen Ozean zwischen Mai und Oktober.

Die Satellitendaten lieferten außerdem eine Erklärung dafür, warum sich das Meeresleuchten gelegentlich bis



**MONSTER DER TIEFSEE**  
Ein Drachenfisch (*Eustomias tetranema*) beherbergt in einem Fortsatz unter dem Kopf leuchtende Bakterien, die Beute anlocken.

ALAMY / NATURE PICTURE LIBRARY / DAVID SHALE

in größere Tiefen auszudehnen scheint, was bei den Seeleuten den Eindruck erweckt, ihr Schiff schwimme plötzlich im Licht: Miller beobachtete eine Häufung von Milchmeeren in den relativ ruhigen Zonen zwischen den großen Ozeanwirbeln, wo eine Kombination aus Strömungen und Temperaturgradienten eine Wassersäule von der umgebenden See isolieren kann, so dass sie zum Stillstand kommt. Unter solchen Bedingungen, so seine Hypothese, könnten sich besonders dichte Bakterienpopulationen bilden, deren »Quorum sensing« sich sowohl vertikal als auch horizontal auf benachbarte Kolonien ausbreitet und dadurch das Volumen der entstehenden Biolumineszenzzone vergrößert.

Miller und Haddock hoffen, dass sich mittels DNB-Sensoren Regionen mit Meeresleuchten besser erkennen oder gar vorhersagen lassen. Dann könnten die Forscher rasch in das betroffene Gebiet fahren und dort Proben sammeln, um ihre Hypothesen zu testen. Bis dahin werden die Milchmeere wohl kaum ihre Geheimnisse preisgeben.

Das Phänomen bleibt auch deshalb rätselhaft, weil viele Fragen über das Wesen, die Funktion und das Ausmaß der Biolumineszenz selbst noch offen sind. Da die meisten leuchtenden Organismen im Meer leben, etliche davon in großen Tiefen, bedarf es beträchtlicher Ressourcen, um die Biolumineszenz an Ort und Stelle zu erforschen – und bleibt riskant. Die Meeresbiologin Edith Widder, die 2005 die Ocean Research & Conservation Association gründete, leistete bereits in den 1980er Jah-



ren Pionierarbeit bei der Erforschung der Biolumineszenz. Immer wieder erlebte sie in ihren Unterwasserfahrzeugen gefährliche, mitunter haarsträubende Situationen, wie ein Leck in mehr als 100 Meter Tiefe. »Einen Großteil meines Forscherlebens habe ich in Tauchbooten in absoluter Dunkelheit verbracht«, erzählt sie mir und ergänzt, dass Kameras erst seit Kurzem in der Lage sind, die geringen Lichtintensitäten sowie die Farben der Biolumineszenz aufzuzeichnen. »Es ist atemberaubend schön, und endlich können es andere Menschen auch sehen.«

Widder und weitere Forscher, die in die Tiefsee vorgegangen sind, wissen schon seit Jahrzehnten, dass Biolumineszenz häufig auftritt. 2017 schätzten Wissenschaftler erstmals verlässlich ab, welcher Anteil der Meeresorganismen Licht erzeugt. Damals veröffentlichten Steven Haddock und Séverine Martini, heute am Institut Méditerranéen d’Océanologie in Marseille, eine Analyse von Videos, die insgesamt 17 Jahre lang mittels ferngesteuerter Fahrzeuge vor der kalifornischen Küste aufgenommen wurden. Die beiden Forscher hatten mehr als 350 000 Einzelbeobachtungen von über 500 Organismengruppen in Tiefen von knapp unter der Wasseroberfläche bis hinab zu fast 4000 Metern gesichtet. Ihr Fazit: Mindestens drei Viertel der im offenen Wasser schwimmenden Meeres-tiere sind zur Biolumineszenz fähig. Dieser Prozentsatz blieb in den verschiedenen Meerestiefen bemerkenswert konstant. 2019 stellten die Forscher fest, dass etwa ein Drittel der am Meeresboden lebenden Organismen biolumineszieren. Und sie entdeckten sogar zum ersten Mal einen leuchtenden Schwamm.

### »Im Meer leuchtet alles«

Da die Meere den größten Lebensraum auf unserem Planeten bilden, legen die beiden Analysen nahe, dass Biolumineszenz eines der dominierenden Merkmale des Lebens darstellt. »Es ist nichts Exotisches, was man sowieso nie zu Gesicht bekommt«, sagt Martini. »Im Meer leuchtet alles – man muss nur genau hinschauen.«

Dabei profitiert der Mensch von leuchtenden Organismen schon länger. So markieren Biomediziner Bestandteile lebender Zellen mit dem grün fluoreszierenden Protein (GFP), das erstmals in den 1960er Jahren aus der Qualle *Aequorea victoria* isoliert wurde. Und Edith Widder nutzt biolumineszierende Bakterien zum Nachweis von Verschmutzungsquellen in der Indian River Lagoon in Florida, einem der artenreichsten Flussmündungssysteme Nordamerikas. Seit Jahrzehnten belasten Düngemittel und Pestizide aus Äckern und Weiden sowie Leckagen aus Abwassersystemen und Klärgruben die Lagune. Dabei lagern sich die Verschmutzungen in den Sedimenten ab. Da viele Schadstoffe die Atmung und damit die Biolumineszenz von Mikroben beeinträchtigen, konnten Widder und ihre Kollegen die relativen Schadstoffkonzentrationen in den verschiedenen Regionen der Lagune bestimmen, indem sie Sedimentproben mit biolumineszierenden Bakterien versetzten. Die dabei gewonnenen Daten helfen, die Umweltbelastung zu überwachen und einzudämmen sowie die Lagune zu regenerieren.

Während die Zahl der technischen Anwendungen wächst, erweisen sich die Möglichkeiten biolumineszierender Meeresorganismen, ihr Licht für das eigene Überleben zu nutzen, als zunehmend bedroht. Der geplante Abbau wertvoller Metalle aus Tiefseesedimenten wird nicht nur den Meeresboden selbst, sondern die gesamte Tiefsee stark in Mitleidenschaft ziehen (siehe »Spektrum« Dezember 2019, S. 52). Hier unten ist das Wasser normalerweise so klar, dass biolumineszierende Organismen über zig Meter miteinander kommunizieren können. Wenn nun Minenroboter den Meeresboden durchpflügen, wirbeln sie dichte Sedimentwolken auf. Das ursprünglich klare Wasser trübt sich zusätzlich ein, wenn nach dem Abbau der verbleibende Schlamm zurück ins Meer verklappt wird – all das gefährdet die Kommunikation zwischen biolumineszierenden Organismen sowie ihre Fähigkeit, Nahrung und Fortpflanzungspartner zu finden.

»Für die Ökologie und die Gesundheit der Ozeane ist es sehr wichtig zu wissen, wie weit verbreitet und wie vielfältig Biolumineszenz ist«, meint Haddock, der 2020 eine Arbeit über die ökologischen Folgen des Tiefseebergbaus mitverfasst hat. »Wenn wir diesen Prozess beeinträchtigen, zieht das Auswirkungen nach sich, die wir erst ansatzweise verstehen.« Das Meeresleuchten, das Generationen von Seefahrern in Angst und Schrecken versetzte, hat keine Opfer gefordert und keine Spuren hinterlassen. Die vom Menschen verursachten Verschmutzungen könnten jedoch das Licht der Ozeane für immer verdunkeln. ◀

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



EPICSTOCKMEDIA / FOTOLIA

## QUELLEN

**Martini, S., Haddock, S. H. D.:** Quantification of bioluminescence from the surface to the deep sea demonstrates its predominance as an ecological trait. *Scientific Reports* 7, 2017

**Miller, S. D.:** Boat encounter with the 2019 Java bioluminescent milky sea: Views from on-deck confirm satellite detection. *PNAS* 119, 2022

**Miller, S. D. et al.:** Honing in on bioluminescent milky seas from space. *Scientific Reports* 11, 2021

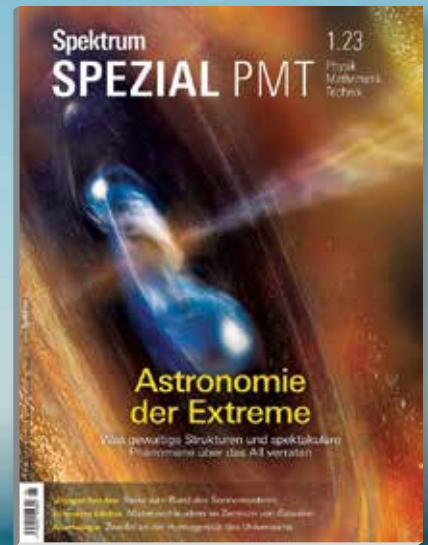
## LITERATURTIPP

**Widder, E.:** *Below the edge of darkness. A memoir of exploring light and life in the deep sea.* Penguin Random House, 2021

*Die Meeresbiologin Edith Widder taucht hinab in die Tiefsee.*

# 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)

# Wie geht es den Korallenriffen?

Die Prognose für die Baumeister des Meeres zeigt auch Lichtblicke.

Text und Grafik: Katie Peek

2021 veröffentlichten die Vereinten Nationen einen umfassenden Bericht über den Zustand der Korallen auf unserem Planeten. Demnach gingen in den zehn Jahren davor 14 Prozent der Riffe verloren. Küstenbaumaßnahmen, Umweltverschmutzung und Überfischung fordern ihren Tribut und lassen zerstörerische Algen über die empfindlichen Stöcke wuchern. Am stärksten sind die Korallenriffe jedoch vom globalen Temperaturanstieg bedroht: Die Polypen verlieren dadurch ihre symbiotischen Algen und bleichen aus. Aber es gibt Hoffnung: Nach den großen Korallenbleichen 1998 und 2005 haben sich die Riffe wieder regeneriert; eine Erholung scheint somit möglich zu sein. Und eine der artenreichsten Meeresregionen der Welt, das Korallenendreieck im westlichen Pazifik, hält tapfer den Widrigkeiten stand.

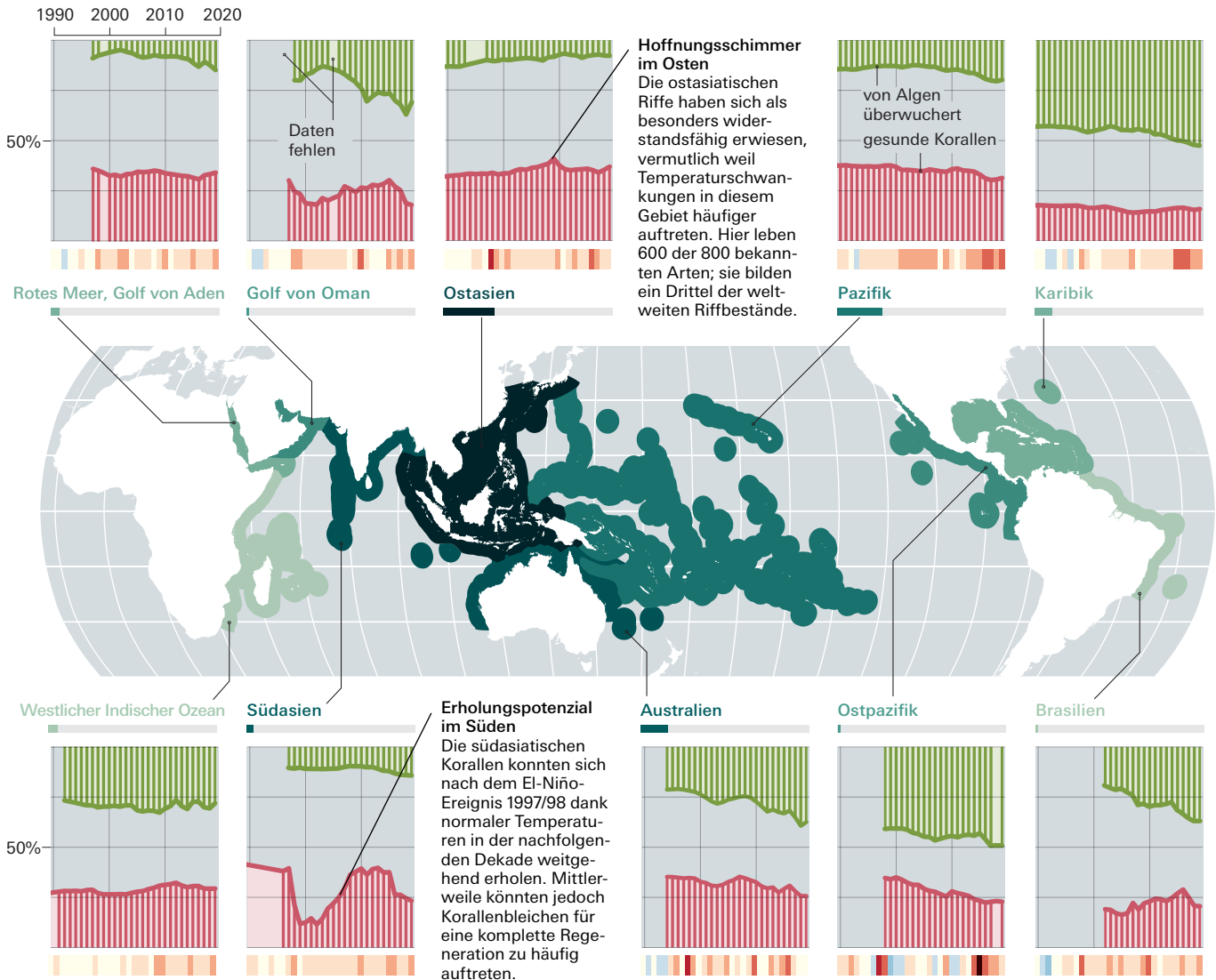
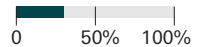
Die Diagramme zeigen den Anteil an gesunden (rosa) und durch Algenbewuchs geschädigten Korallen (grün) im Verlauf der Jahre 1990 bis 2019.



Der Farbcode gibt die Veränderung der Wassertemperatur im Vergleich zum langjährigen Mittel von 1971 bis 2000 wieder.



Die Balken repräsentieren den Anteil der jeweiligen Region am weltweiten Korallenbestand.



KATIE PECK: NACH: STATUS OF CORAL REEFS OF THE WORLD: 2020. GERMAN ICRU, AUSTRALIAN INSTITUTE OF MARINE SCIENCE © UNFCCC/AMNET/2020-REPORT/17 / SCIENTIFIC AMERICAN MIAI 2022

MEDIZIN

# Organspende aus dem Tierreich

Chirurgen haben erstmals Herzen und Nieren von Schweinen in menschliche Empfänger verpflanzt. Eine neue Hoffnung für die vielen Menschen, die auf ein Spenderorgan warten?

» [spektrum.de/artikel/2120760](https://spektrum.de/artikel/2120760)



**Sara Reardon** arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Bozeman, Montana.

**INNOVATIVE OP** In Maryland haben Ärzte einem Patienten erstmals ein Schweineherz eingepflanzt.



UNIVERSITY OF MARYLAND MEDICAL CENTER (UMMC)

▶ David Bennets Herz baute immer weiter ab und würde bald endgültig versagen. Der 57-jährige Handwerker aus Maryland hatte nur noch wenige Wochen zu leben. Medizinische Behandlungsoptionen blieben ihm kaum mehr. Bennet hatte sich nicht an die Therapieanweisungen seiner Ärzte gehalten und galt als unkooperativ. Daher wollten sie es angesichts drängender Organknappheit nicht verantworten, ihm ein Spenderherz einzupflanzen. Zumindest kein menschliches.

Anfang Januar 2022 boten ihm die Mediziner an, ein Schweineherz implantiert zu bekommen. Obwohl der Eingriff nicht erprobt war, geschweige denn in systematischen klinischen Studien, und die Erfolgsaussichten daher ungewiss schienen, stimmte Bennet zu. »Ich weiß, dass es ein Schuss ins Blaue ist, aber es ist meine einzige Chance«, zitierte ihn das University of Maryland Medical Center in Baltimore, wo er behandelt wurde. Am 7. Januar setzten ihm die dortigen Ärzte das Tierherz ein. Das Organ war genetisch verändert worden, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, vom menschlichen Körper toleriert zu werden.

Bennet überlebte acht Wochen mit dem neuen Körperteil. Anfang März verschlechterte sich sein Gesundheitszustand jedoch, und einige Tage später starb er. Nach seinem Tod stellte sich heraus, dass das Organ mit Herpesviren infiziert gewesen war, denen Schweine als Wirte dienen. In den vorangegangenen Tests war das unmerklich geblieben.

Acht Wochen mag sich nach nicht viel anhören. Aber es ist nach derzeitigen Vergleichskriterien eine bemerkenswert lange Zeit des Durchhaltens für ein tierisches Organ, das einem menschlichen Körper eingesetzt wurde und somit ein Xenotransplantat darstellt (von griechisch *xénos* = fremd und lateinisch *transplantatio* = Verpflanzung). Genetisch unveränderte Schweineorgane attackiert das menschliche Immunsystem normalerweise binnen weniger Minuten – deshalb sind Forscherinnen und Forscher, die sich mit Xenotransplantation befassen, von Bennets Fallgeschichte sehr beeindruckt. »Ich hätte nie



UNIVERSITY OF MARYLAND MEDICAL CENTER (UMMC)

gedacht, dass der Patient fast zwei Monate lang überlebt«, sagt Luhan Yang, Biomedizinerin und Geschäftsführerin des Unternehmens Qihan Biotech im chinesischen Hangzhou. »Meiner Meinung nach ist das ein großer wissenschaftlicher Erfolg.«

Es gab im Jahr 2022 noch weitere Aufsehen erregende Nachrichten auf diesem Forschungsgebiet. Einige Wochen nach Bennets Tod berichteten zwei internationale Arbeitsgruppen unabhängig voneinander, Menschen erstmals Schweineieren eingesetzt zu haben. Die drei Personen, an denen der Eingriff erfolgte, waren zuvor rechtlich für tot erklärt worden, da sie keine nachweisbare Hirnfunktion mehr aufwiesen. Wie das Experiment ergab, produzierten die transplantierten Organe wie vorgesehen Urin und wurden vom Immunsystem der Empfänger nicht abgestoßen – selbst am dritten Tag nach dem Eingriff nicht. Im Juni und Juli 2022 nahmen Chirurgen zwei weitere Verpflanzungen von Schweineherzen in hirntote Personen vor.

Viele Experten erwarten, dass es schon bald kleinere Studien geben wird, um die klinische Anwendung der Xenotransplantation systematisch zu testen – zunächst an schwerstkranken Patienten. Die Befürworter betonen, Xenotransplantation könne die Liste der Personen verkürzen, die verzweifelt auf ein Spenderorgan warten (und von denen viele sterben, bevor sie es bekommen haben). Allein in den USA betrifft das derzeit mehr als 100 000 Menschen; in Deutschland sind es rund 8500. Diverse Anträge auf solche Transplantationsverfahren sind bei den zuständigen Stellen eingegangen, etwa der US-Arzneimittelbehörde FDA (Food and Drug Administration). Die Prüfverfahren dazu laufen noch.

Angesichts der wachsenden Zahl von US-Forschungsteams, die klinische Studien mit Xenotransplantaten starten möchten, berief die FDA Mitte 2022 ein Treffen

ein. Dort versuchten Wissenschaftler, die behördlichen Mitarbeiter davon zu überzeugen, dass solche Verfahren für Anwendungen am Menschen bereit seien. Hierfür legten sie empirische Daten vor, die von Versuchen an hunderten Pavianen stammen. Die Tiere hatten bis zu drei Jahre lang überlebt, nachdem sie Schweineorgane oder -zellen eingesetzt bekommen hatten – hauptsächlich Herzen, Nieren und Insulin produzierende Inselzellen der Bauchspeicheldrüse.

Die Fachleute sehen den Zeitpunkt für einschlägige klinische Studien gekommen. Solche Untersuchungen sind ihrer Ansicht nach nötig, um herauszufinden, welcher Typ Schwein sich für welche Anwendung am besten eignet und wie man sicherstellen kann, dass die Tiere keine Krankheitserreger in sich tragen. »Ich denke, wir sollten diesen Schritt jetzt gehen«, sagt beispielsweise Wayne Hawthorne, ein Transplantationschirurg von der University of Sydney in Australien.

### Massenhaft gezüchtet

Bennets Fallgeschichte hat eine nie da gewesene öffentliche Aufmerksamkeit auf das Fachgebiet gelenkt – und zugleich die Risiken der Xenotransplantation beleuchtet. Die Experten sind sich im Klaren darüber, dass sie vorsichtig vorgehen müssen. »Sobald ein größeres Problem auftritt, könnte das die gesamte Forschungsrichtung zurückwerfen«, mahnt Hawthorne.

Transplantationsmediziner haben schon immer große Hoffnungen in Xenotransplantate gesetzt, da sie seit jeher unter einem Mangel an geeigneten Organen leiden. In den 1960er Jahren begannen Mediziner damit, Schimpan- und Pavianorgane in Menschen zu verpflanzen. Mit mäßigem Erfolg, denn die Aufzucht hinreichend vieler Tiere erwies sich als nicht praktikabel.

Es zeigte sich, dass Schweine die besseren Spenderorganismen sind. Sie ähneln dem Menschen hinsichtlich Größe und Anatomie, werden massenhaft gezüchtet und sind daher in großen Individuenzahlen verfügbar. Schweineorgane haben sogar Vorteile gegenüber menschlichen Körperteilen: Sie lassen sich zum jeweils gewünschten Zeitpunkt frisch entnehmen, und ihre chirurgische Verpflanzung ist im Voraus planbar. Bei menschlichen Spendern dagegen müssen sich sowohl der Patient als auch das Ärzteteam jederzeit bereithalten für den Fall, dass eine genetisch passende Person stirbt – und den Eingriff dann sofort durchführen, weil das Organ binnen weniger Stunden transplantiert werden muss.

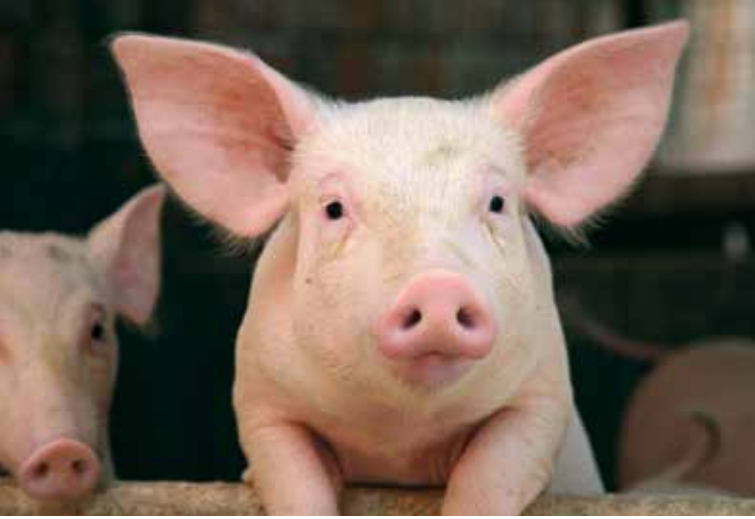
Hinzu kommt: Nicht von allen Organspendern sind die medizinische Vorgeschichte und die genetischen Merkmale hinreichend bekannt. »Da es stets schnell gehen muss, haben wir immer nur rund eine Stunde Zeit, das abzuklären«, sagt Jay Fishman, Spezialist für übertragbare Krankheiten am Massachusetts General Hospital in Boston. Bei geplanten Transplantationen von Schweineorganen ließen sich im Vorfeld weitaus gründlichere Tests durchführen.

Bis in die frühen 1990er Jahre hinein gab es bei Schweineorganen das große Problem, dass sie von der

## AUF EINEN BLICK

# Auf Herz und Nieren

- 1** Die Zahl der verfügbaren Spenderorgane reicht bei Weitem nicht aus, um den therapeutischen Bedarf daran zu decken. Organe von Tieren könnten die Lücke füllen.
- 2** Als mögliche Spenderorganismen kommen Schweine in Frage, da sie uns anatomisch ähneln. Dank Gentechnik gelingt es immer besser, die Abstoßung transplantiertierter Tierorgane im menschlichen Körper zu verhindern.
- 3** Erste Versuche mit Schweineherzen und -nieren sind aus medizinischer Sicht erfolgreich verlaufen. Doch es bleibt noch viel zu klären.



FOTOSURF/GETTY IMAGES/ISTOCK

**DEM MENSCHEN ÄHNLICH** Schweine sind uns in Größe und Anatomie vergleichbar und könnten sich deshalb als passende Organspender erweisen.

menschlichen Körperabwehr rasch abgestoßen wurden. Der Transplantationschirurg David Cooper vom Massachusetts General Hospital fand eine mögliche Lösung dafür, als er entdeckte: Das Immunsystem des Menschen und anderer Primaten reagiert hauptsächlich auf ein Zuckermolekül namens Galaktose-alpha-1,3-Galaktose (Alpha-Gal), das an der Oberfläche der Schweinezellen sitzt. Alpha-Gal entsteht im Zellstoffwechsel unter Mitwirkung eines Proteins. Schaltet man das Gen aus, das für dieses Protein codiert, hindert man die Zellen daran, die Zuckerverbindung herzustellen. Organe von Schweinen, die genetisch entsprechend verändert worden sind, überdauern nach einer Verpflanzung in nicht menschliche Primaten deutlich länger, weil das primateneigene Immunsystem sie weniger stark attackiert.

Die Entdeckung der »Genschere« CRISPR-Cas, mit der sich das Erbgut modifizieren lässt (siehe »Spektrum« Oktober 2017, S. 50), erwies sich hier als äußerst hilfreich. Sie erleichtert gentechnische Eingriffe enorm – sowohl den Erbfaktor betreffend, der an der Produktion von Alpha-Gal mitwirkt, als auch bei diversen weiteren Genen, die bei Immunreaktionen eine Rolle spielen. CRISPR-Cas erlaubt es, das Genom von Schweinen umfassend zu verändern, wodurch menschliche Körper deren Organe eher tolerieren. Mehrere Firmen versuchen momentan, daraus ein praxistaugliches Transplantationsverfahren zu entwickeln; bisher ist allerdings keiner ihrer Ansätze über begrenzte klinische Studien hinausgekommen.

Jenes Schwein, von dem David Bennet sein Herz bekam, stammte von dem Unternehmen Revivicor in Blacksburg, Virginia. Sein Genom war an zehn Stellen künstlich verändert worden. Revivicor manipulierte vier tierische Erbfaktoren – darunter einen, der das Größenwachstum der Organe steuert – und fügte sechs menschliche Gene hinzu. Vier der Letzteren unterdrücken die Immunreaktion, die restlichen zwei verhindern, dass das Blut infolge von Entzündungen gerinnt.

Andere Teams verfolgen davon abweichende Ansätze. Forscher des Unternehmens Makana Therapeutics in Miami beispielsweise modifizieren lediglich drei Gene

ihrer Schweine, um zu verhindern, dass die Antikörper des Empfängerorganismus die Organe der Tiere angreifen. Laut Unternehmensgründer Joe Tector haben sie Erfolg, zumindest in Versuchen mit nicht menschlichen Primaten. »Je besser die Gentechnik wird, desto leichter fällt es uns, den Schweinezellen DNA hinzuzufügen oder Teile ihres Genoms gegen anderes DNA-Material auszutauschen«, führt er aus.

Eckhard Wolf, Molekularbiologe an der Ludwig-Maximilians-Universität in München, forscht ebenfalls über Xenotransplantation. »Wir versuchen generell, die Dinge so einfach wie möglich zu halten«, beschreibt er den Arbeitsansatz seines Teams. Wolfs Forschungsgruppe hat das Genom wilder Minischweine an fünf Stellen verändert. Die ersten derart manipulierten Tiere sind im September 2022 auf die Welt gekommen. Ihre Organe werden von Natur aus ähnlich groß wie jene des Menschen, ihr Wachstum muss daher nicht gentechnisch beeinflusst werden, um verpflanzbare Körperteile zu erhalten. Das Team plant, Herzen aus Minischweinen testweise in Paviane zu transplantieren. Geht dabei alles gut, könnte die Europäische Arzneimittel-Agentur (European Medicines Agency, EMA) innerhalb der kommenden drei Jahre einer klinischen Studie mit menschlichen Teilnehmern zustimmen.

### Schwer nachvollziehbare Logik

Noch steht die klinische Erprobung der Xenotransplantation am Anfang; die bisher vorliegenden empirischen Daten stammen hauptsächlich aus Versuchen mit nicht menschlichen Primaten. Einige Affenarten neigen allerdings – aus bisher unbekanntem Gründen – dazu, mehr Antikörper gegen eingepflanzte Schweineorgane zu entwickeln als der Mensch. Es ist deshalb nicht klar, inwieweit die Erkenntnisse aus diesen Tierexperimenten auf uns übertragbar sind. Trotzdem verlangen Zulassungsbehörden wie die FDA von vielen Forschungsteams mehr Daten aus Primatenversuchen. »Es ist, als würde man sagen: Ein Arzneistoffkandidat, mit dem Spezies A behandelt werden soll, wirkt bei dieser offensichtlich anders als bei Spezies B – aber lässt ihn uns trotzdem an Spezies B testen«, kritisiert der Transplantationschirurg David Cooper die Praxis. »Es entbehrt jeder Logik, so vorzugehen.« Die FDA äußert sich öffentlich nicht dazu, wie viele Daten aus Primatenexperimenten sie im Einzelfall als notwendig erachtet. Sie hat allerdings einen einschlägigen Leitfaden für die Industrie herausgegeben. Darin heißt es, Studien an Tiermodellen reichten nicht aus, um die Anwendungssicherheit von Xenotransplantaten zu bewerten – besonders im Hinblick auf die mögliche Übertragung von Krankheitserregern.

Verpflanzungen von Tierorganen in hirntote Menschen könnten einen akzeptablen Zwischenschritt darstellen. Der Chirurg Robert Montgomery von der New York University, der 2022 an der Übertragung von Schweineieren in zwei hirntote Personen beteiligt war, hält weitere solche Versuche für notwendig, bevor er klinische Studien mit lebenden Teilnehmern beantragt. Die Tiere, von denen

die Organe stammten, wiesen lediglich eine einzige genetische Veränderung auf, die das zelleigene Zuckermolekül Alpha-Gal betraf. Die FDA hatte Schweine mit dieser Genmodifikation im Dezember 2020 zum Verzehr sowie für einige medizinische Anwendungen frei gegeben, nicht aber für Transplantationen. Montgomery möchte das Genom der Spendertiere so wenig manipulieren wie möglich: Er befürchtet, eine komplexe Kombination mehrerer genetischer Eingriffe könnte zu unvorhersehbaren Wechselwirkungen führen.

Einige Forscherinnen und Forscher meinen, Studien mit lebenden Probanden seien der beste Weg, um zu klären, ob der menschliche Organismus tierische Transplantate abstößt – möglicherweise erst Monate nachdem sie eingepflanzt wurden. Hirntote Menschen so lange künstlich am Leben zu erhalten, sei aus ethischen Gründen bedenklich, betont Jayme Locke. Die Transplantationsmedizinerin von der University of Alabama in Birmingham hat im Jahr 2022 eine Arbeitsgruppe geleitet, die ebenfalls Schweinenieren in eine hirntote Person verpflanzte. Locke möchte klinische Tests mit Nieren jener Revivicor-Schweine durchführen, von denen David Bennet sein Herz erhielt. Ihr Team hat eine solche Studie bereits beantragt; die behördliche Genehmigung steht jedoch aus, und es ist noch nicht einmal die Rekrutierung der Teilnehmer angelaufen.

Andere Verfahren, etwa das Verpflanzen Insulin produzierender Inselzellen des Schweins in den Menschen, erscheinen weniger problematisch, da sie den Organismus wohl nur zu einer relativ schwachen Immunreaktion provozieren. Bei solchen Eingriffen genügte möglicherweise schon einfache genetische Veränderungen, betont der Transplantationsmediziner Wayne Hawthorne. Sein Team hat Spenderschweine gezüchtet, aus denen sich Inselzellen gewinnen lassen, die kein Alpha-Gal herstellen und die zwei zusätzliche Gene mit immunhemmender Wirkung tragen. Im Juni 2022 berichtete seine Arbeitsgruppe, entsprechende Inselzellen auf fünf Paviane übertragen und diese damit von Diabetes geheilt zu haben. Die Tiere benötigten in den folgenden zwei Jahren weder Insulin noch immununterdrückende Medikamente.

### Gefahr der Weitergabe von Keimen

Hawthorne plant eine klinische Studie, in der Menschen mit einer schweren Form des Diabetes Typ 1, die sich durch extrem schnellen Blutzuckerabfall auszeichnet, Inselzellen aus Spenderschweinen erhalten. Sollte er die Fördermittel und die Bewilligung bekommen, könnten die Versuche binnen eines Jahres beginnen, sagt er. Schon 2018 hatte ein Team um James Shapiro von der University of Alberta (Kanada) in einer Übersichtsarbeit belegt, dass Inselzellen des Schweins für menschliche Empfänger unbedenklich zu sein scheinen.

Zu den größten Schwierigkeiten der Xenotransplantation gehört die mögliche Übertragung von Krankheitskeimen. Tier-zu-Mensch-Infektionen können in mehrfacher Hinsicht zum Problem werden. Erreger, denen Schweine als Wirte dienen, könnten beispielsweise von verpflanzten

## Organspende in Deutschland

In Deutschland stehen derzeit etwa 8500 Menschen auf der Warteliste für ein Spenderorgan. Die meisten davon – zirka 6600 – benötigen eine Niere, jeweils einige hundert brauchen eine Leber, ein Herz, eine Lunge oder eine Bauchspeicheldrüse. Manche sind auf eine kombinierte Transplantation mehrerer Körperteile angewiesen.

826 Personen auf der Warteliste starben im Jahr 2021; rund 4600 kamen neu hinzu. Dem gegenüber standen damals bundesweit 933 Organspender und -spenderinnen, das waren 20 mehr als im Vorjahr. Auf je eine Million Einwohner in Deutschland kamen somit etwa 11 Menschen, die in diesem Jahr ihre Organe nach dem Tod zur Verfügung stellten. In Spanien lag der Anteil bei 38, die Bereitschaft zu spenden ist dort also deutlich höher.

Organspenderinnen und -spendern in Deutschland werden post mortem durchschnittlich drei Organe entnommen und transplantiert. 3508 Organe sind im Jahr 2021 verpflanzt worden; seit 1963 waren es insgesamt 146000.

### QUELLE

Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung: Organspende – die Entscheidung zählt. [organspende-info.de/zahlen-und-fakten/statistiken](https://organspende-info.de/zahlen-und-fakten/statistiken); Stand: Februar 2023

Organen auf den menschlichen Organismus überspringen. Diese Befürchtung war der Grund, warum die Firma Qihan Biotech ihre Arbeiten auf dem Gebiet der Xenotransplantation stoppte, nachdem Anfang 2022 die Afrikanische Schweinepest in China ausgebrochen war. Die Forscher des Unternehmens züchteten daraufhin mit Hilfe von Gentechnik eine Schweinesorte, die dieser Krankheit gegenüber resistent ist.

Zudem enthält das Genom der Tiere so genannte endogene Retroviren (englisch: porcine endogenous retroviruses, kurz PERVs). Das sind Nukleinsäureschnipsel von Viren, die mit dem Erbgut ihrer Wirte verschmolzen sind und von Generation zu Generation weitervererbt werden. Beim Menschen gibt es solche Elemente ebenfalls. PERVs sind für Schweine überwiegend harmlos, genau wie unsere Retroviren für uns. Nach aktueller Studienlage scheint aber unklar, ob PERVs aus Tierorganen auf menschliche Zellen übergehen und uns so gefährlich werden können. »Wir wissen noch zu wenig, um zu beurteilen, wie groß das Risiko ist«, sagt Luhan Yang.

Yang und ihr Kollege George Church von der Harvard Medical School in Boston versuchen dieses Risiko zu minimieren, indem sie die Genschere CRISPR-Cas gegen



die Basensequenzen aller bekannten PERVs im Schweinegenom einsetzen und die viralen Elemente so deaktivieren. Dabei manipulieren sie das Erbgut der Tiere an mehr als 60 Stellen – ein Rekordwert. »Viele haben sich gefragt, ob die Spendertiere nach derart vielen genetischen Eingriffen überhaupt noch lebensfähig sind«, sagt Michael Curtis, Geschäftsführer des Biotech-Unternehmens eGenesis in Cambridge, Massachusetts. Church und Yang haben jene Firma gegründet, um die Anwendung der CRISPR-Cas-Technologie im Rahmen von Xenotransplantationen zur Marktreife zu bringen. Ein Pavian, dem sie eine Schweineiere mit dutzenden PERV-inaktivierenden Erbgutveränderungen eingepflanzt haben, überlebte fast ein Jahr lang. eGenesis arbeitet aktuell daran, Schweineherzen, -nieren und -lebern mit bis zu 80 genetischen Modifikationen herzustellen – je nach beabsichtigtem Einsatz.

### Es bleibt ein Restrisiko

Doch selbst, wenn man alle bekannten PERVs ausschalten würde, wäre es immer noch möglich, dass plötzlich ein bis dato unbeachteter Erreger in Erscheinung tritt und dem Empfängerorganismus schadet, betont der Mediziner Jay Fishman vom Massachusetts General Hospital: »Wir müssen nach wie vor mit unbekanntem Pathogenen rechnen.« Ein Patient, der eine Spenderlunge von einem Schwein erhalten hat, könnte beispielsweise eine seltene Atemwegserkrankung bekommen, die sonst nur diese Tiere befällt. Eine weitere Möglichkeit: Zwei Virenstämme, die unterschiedliche Wirte infizieren, könnten im menschlichen Körper rekombinieren und dabei einen neuen Erreger hervorbringen – so wie es bei Influenzaviren in Vögeln, Fledermäusen und Schweinen ständig geschieht.

Um das Risiko für die öffentliche Gesundheit zu minimieren, empfiehlt die FDA, Schweineorgane nur solchen Menschen einzusetzen, die keine andere Wahl mehr haben und bei denen infolge des Eingriffs eine deutliche Verbesserung der Lebensqualität zu erwarten ist. Die Behörde teilt mit, sie habe strenge Richtlinien aufgestellt, um die betroffenen Patienten langfristig zu überwachen und es ihnen zu verbieten, Blut zu spenden.

Bei dem Herz, das David Bennet eingesetzt bekam, stellte sich heraus, dass es mit porcinen Zytomegalieviren infiziert gewesen war, die zur Familie der Herpesviren gehören und sehr viele Schweine befallen. Es ist nicht klar, ob sie es waren, die Bennet das Leben kosteten. Der Mediziner Muhammad Mohiuddin von der University of Maryland, der die Xenotransplantation wissenschaftlich begleitet hat, sagt, es gebe keine Beweise für eine Schädigung des Herzens durch die Viren. Auch ein Überspringen der Erreger auf Bennets übrigen Körper sei nicht erkennbar gewesen. Mohiuddin vermutet deshalb, der Tod des Patienten habe mit der fortgeschrittenen Herzkrankung oder mit OP-bedingten Komplikationen zu tun gehabt.

Freilich kann der Mediziner nicht ausschließen, dass die Zytomegalieviren (CMV) bei alledem eine Rolle spielen. Das Unternehmen Revivacor hatte seine Schweine

auf Erbgutmoleküle zahlreicher Pathogene getestet, auch auf solche von CMV – mit negativem Ergebnis. Mohiuddin und andere Experten nehmen deswegen an, dass die Tiere latent infiziert waren und ihre Viren nur durch Antikörpertests nachweisbar gewesen wären (die nicht stattfanden). Revivacor teilt mit, inzwischen empfindlichere CMV-Tests entwickelt zu haben, gibt aber keine Auskunft darüber, auf wie viele verschiedene Pathogene es seine Zuchttiere prüft.

Mohiuddin, dessen Team den Eingriff an David Bennet vornahm, ist bereit für weitere Transplantationen dieser Art – allerdings nur, sobald er sicher sein kann, dass die Tierorgane virenfrei sind. Er sagt, es meldeten sich immer wieder Behandlungszentren bei ihm, deren Patienten sich einer Xenotransplantation unterziehen wollten und aus medizinischer Sicht gute Kandidaten dafür seien. Doch bislang lehne er ab. »Bevor ich jemand anderen zufrieden stellen kann, muss ich erst selbst von dem überzeugt sein, was ich anbiete«, meint er.

Die ersten Tierorgane, deren Xenotransplantation in das Stadium klinischer Studien eintreten wird, dürften Nieren sein, vermutet Joe Tector. Nieren seien einfacher aufgebaut als viele andere Organe und deshalb leichter zu verpflanzen. Was die Übertragung komplexerer Körperteile angeht, plant eGenesis einen Zwischenschritt. Das Unternehmen möchte Studienteilnehmer, deren Leber versagt hat, jeweils vorübergehend an separate – nicht in den menschlichen Körper eingesetzte – Schweinelebern anschließen. Die Tierorgane sollen dann deren Blut von Giftstoffen säubern, ein Verfahren ähnlich der Dialyse bei Nierenversagen.

Obwohl noch viele Fragen zu klären und Bedenken auszuräumen sind, scheinen klinische Studien mit Xenotransplantaten in nicht mehr allzu ferner Zukunft zu liegen. Es werde dann das Wichtigste sein, so viele Patientendaten wie möglich zu sammeln, betonen Experten wie Jay Fishman. Denn nur so ließe sich erreichen, dass Mediziner solche Eingriffe eines Tages sicher beherrschen. ◀

### QUELLEN

**Griffith, B. P. et al.:** Genetically modified porcine-to-human cardiac xenotransplantation. *New England Journal of Medicine* 387, 2022

**Hawthorne, W. J. et al.:** Xenotransplantation of genetically modified neonatal pig islets cures diabetes in baboons. *Frontiers in Immunology* 13, 2022

**Montgomery, R. A. et al.:** Results of two cases of pig-to-human kidney xenotransplantation. *New England Journal of Medicine* 386, 2022

**Porrett, P. M. et al.:** First clinical-grade porcine kidney xenotransplant using a human decedent model. *American Journal of Transplantation* 22, 2022

### nature

© Springer Nature Limited

[www.nature.com](http://www.nature.com)

Nature 611, S. 654–657, 2022

# Klimaschutz auf Kosten der Natur

Die Europäische Union hat den Klimaschutzplan »Fit for 55« vorgestellt. Dessen Maßnahmen werden dazu führen, mehr Holz einzuschlagen, Anbauflächen für Nahrungspflanzen zu verlieren und die globale Entwaldung voranzutreiben. Ein Kommentar.

» [spektrum.de/artikel/2120763](https://spektrum.de/artikel/2120763)

DANIEL SCHWENK / COMMONS SYMBOLE  
KREMLIN / ANSA / G. F. / G. F. / G. F.  
CREATIV COMMONS BY SA 4.0 / LEGAL.COM



Von links nach rechts: **Timothy Searchinger** und **Oliver James** arbeiten in der Forschungsstelle für Energie- und Umweltpolitik der Princeton University (New Jersey, USA). **Patrice Dumas** ist leitender Forscher am Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Paris). **Thomas Kastner** arbeitet als Wissenschaftler am Senckenberg Biodiversität und Klima Forschungszentrum (Frankfurt a. M.). **Stefan Wirsenius** ist außerordentlicher Professor für Umwelt- und Ressourcenbewertung in der Landwirtschaft an der Chalmers University of Technology (Göteborg, Schweden).

**MONOKULTUR** Energiepflanzen wie Raps anzubauen, belegt Ackerflächen und zerstört Habitate.

DAVID SCHWEN / COMMONS WIKIMEDIA ORGANISATION / CREATIVE COMMONS ORG (CC BY-SA 4.0 SALEGARDBER)

AUF EINEN BLICK

## Streit um die Biomasse

- 1** Um die Klimaschutzziele einzuhalten, will die EU ihre Treibhausgasemissionen vermindern. Hierfür plant sie, mehr Bioenergie zu nutzen.
- 2** Bioenergie erfordert allerdings Anbaugelände für Energiepflanzen. Sie treibt damit die Zerstörung natürlicher Habitate voran und beansprucht Flächen für die Nahrungsmittelproduktion.
- 3** Die EU verlagert diese Probleme massiv ins Ausland. Damit untergräbt sie den Klima- und Artenschutz.

Es gibt viele mögliche Strategien, die weltweite Erwärmung auf ein beherrschbares Maß zu reduzieren und die globale Artenvielfalt zu erhalten. Nahezu alle von ihnen setzen voraus, dass die Menschheit ihre landwirtschaftliche Nutzfläche reduziert oder zumindest nicht weiter vergrößert. Genauer gesagt muss die Menschheit ihren terrestrischen Kohlenstoff-Fußabdruck verringern, sprich den Kohlenstoffverlust in Landökosystemen reduzieren, den die Land- und Forstwirtschaft verursacht. Da sowohl die Weltbevölkerung als auch die mittleren Einkommen weiter wachsen, werden die Staaten im Jahr 2050 etwa 40 bis 60 Prozent mehr Getreide benötigen als im Jahr 2010 – sowie bis zu 70 Prozent mehr Milch und Fleisch (siehe »Spektrum« Dezember 2022, S. 42). Selbst wenn man berücksichtigt, dass die Erträge in diesem Zeitraum ebenfalls zunehmen werden, dürfte das zusätzliche 100 bis 400 Millionen Hektar an globaler Anbaufläche

erfordern. Die Trends in den bisher vorliegenden Fernerkundungsdaten deuten sogar darauf hin, dass der tatsächliche Zuwachs bei 450 Millionen Hektar liegen dürfte – eine Fläche anderthalbmal so groß wie Indien.

Es liegt auf der Hand, dass die Staaten mehr tun müssen, damit ihr terrestrischer Kohlenstoff-Fußabdruck nicht weiter wächst. Das lässt sich erreichen, indem man die Erträge von Ackerbau und Viehzucht steigert und zugleich die Nachfrage danach senkt, insbesondere jene nach Fleischprodukten, deren Erzeugung große Flächen beansprucht.

Außerdem muss die Menschheit ihre Emissionen aus fossilen Brennstoffen möglichst rasch reduzieren. Die Europäische Union, die eine Schlüsselrolle dabei spielt, steht vor der Verabschiedung eines ehrgeizigen Plans namens »Fit for 55«. Das ist ein Maßnahmenpaket, mit dem die EU ihre Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 Prozent senken will, bezogen auf den Stand von 1990. Im Mittelpunkt des Plans stehen neue Energiegesetze: eine überarbeitete Richtlinie, um den Anteil erneuerbarer Energien bis 2030 auf 40 bis 45 Prozent zu erhöhen; strengere Emissionsobergrenzen für Fabriken und Kraftwerke; sowie Auflagen für die Luft- und Schifffahrtindustrie, um auf alternative Kraftstoffe umzusteigen. Die EU ist überdies dabei, Gesetze zu verabschieden, die die natürlichen Kohlenstoffspeicher an Land sowie die Biodiversität in Europa schützen und Abholzungsprojekte im Ausland einschränken sollen.

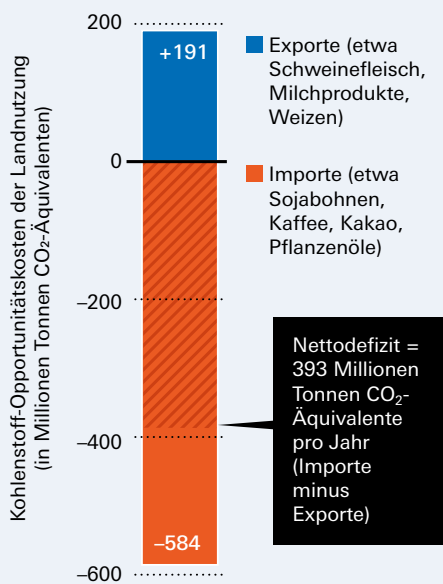
Der Plan kann ein Stück weit dazu führen, die Emissionen zu reduzieren. Doch die weit gefassten Regeln, mit denen er die Bioenergie fördert, gefährden die terrestrische Kohlenstoffspeicherung sowie die biologische Vielfalt – in Europa wie weltweit. Denn sie werden dazu führen, dass die landwirtschaftliche Produktion in andere Länder ausgelagert wird. Indem sie Biomasse als »kohlenstoffneutral« werten, schaffen die Vorschriften diverse Anreize dafür, Holz einzuschlagen und Ackerland für Energiepflanzen zu nutzen – ohne Rücksicht darauf, wie sich das auf die terrestrische Kohlenstoffspeicherung auswirkt.

Im zurückliegenden Jahr hat sich gezeigt, wie der Ukrainekrieg die globale Lebensmittelversorgung gefährdet. Einmal mehr ist klar geworden, dass Entscheidungen zur Landnutzung gravierende Folgen haben. Wir (die Autoren) haben errechnet: Würde Europa auf 85 Prozent seines Biodiesels verzichten und außerdem die EU samt den USA auf die Hälfte ihres aus Getreide hergestellten Ethanols, dann würden genügend Anbauflächen frei, um die gesamten ukrainischen Pflanzenöl- und Getreideexporte zu kompensieren. Wir sind deshalb überzeugt davon, dass Europa einen umweltverträglicheren Weg einschlagen sollte, als es die Planungen derzeit vorsehen.

In der Bioenergie-Debatte kommt manchmal der Eindruck auf, in Europa stünden »freie« Flächen für den Anbau von mehr Energiepflanzen zur Verfügung. Das ist ein Trugschluss, der daraus resultiert, dass der Kontinent historisch gesehen einen riesigen Kohlenstoff-Fußabdruck hinterlassen hat. Die landwirtschaftlichen Anbaugelände

## Europas Kohlenstoff-Handelsdefizit

Die Agrarimporte der EU verursachen Treibhausgasemissionen in Höhe von 400 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten jährlich. Das lässt sich verhindern. Eine Steigerung der Ernteerträge und eine Drosselung des Fleisch- und Milchkonsums würden es ermöglichen, mit bis zu 30 Prozent weniger Anbaufläche auszukommen. Dieses Land ließe sich beispielsweise renaturieren, um die biologische Vielfalt und die natürliche Kohlenstoffspeicherung zu fördern. Allerdings nicht, wenn Europa mehr Ackerland für Bioenergie beansprucht.



NATURE NACH TIMOTHY SEARCHINGER, SEARCHINGER, T. ET AL.: EU CLIMATE PLAN SACKRIFICES CARBON STORAGE AND BIODIVERSITY FOR BIOENERGY. NATURE 612, 2022. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

in Europa sind in den vergangenen Jahrzehnten zwar geschrumpft, so dass Wälder heute wieder 35 Prozent des Kontinents bedecken, verglichen mit 25 Prozent im Jahr 1900. Doch die baumbestandene Fläche umfasst immer noch weniger als die Hälfte ihrer einstigen Gesamtgröße. Die meisten Wälder werden zwecks Holzgewinnung bewirtschaftet und nicht, um Kohlenstoff zu speichern oder die Biodiversität zu erhalten.

Davon unbenommen ist es lehrreich, aus welchen Gründen jetzt wieder mehr Bäume in Europa wachsen. Nämlich maßgeblich, weil Pflanzenanbau und Viehzucht höhere Erträge abwerfen – und sich das Bevölkerungswachstum verlangsamt hat. Überdies benötigen heutige Gesellschaften weniger Arbeitstiere, was die Notwendigkeit verringert hat, riesige Flächen für Weideland und Futtermittelproduktion zu nutzen.

### Sinkender Bedarf

Der Klimaschutz erfordert, dass Europa seinen terrestrischen Kohlenstoff-Fußabdruck verringert. Das ist machbar, denn die Einwohnerzahl wird in den kommenden Jahrzehnten voraussichtlich stabil bleiben oder abnehmen, und der Fleischkonsum hat laut Marktanalysen seinen Gipfelpunkt erreicht. Zugleich ist eine weitere Steigerung landwirtschaftlicher Erträge zu erwarten. Darum sagen dieselben Modelle, die bis zum Jahr 2050

ein globales Wachstum der Anbaugelände prognostizieren, für Europa einen Rückgang entsprechender Flächen um 10 bis 50 Millionen Hektar voraus. Anders ausgedrückt: Wenn Europa seine Anbauflächen in den kommenden Jahrzehnten trotzdem nicht verkleinert, fällt der globale Zuwachs höher aus als ohnehin schon befürchtet.

Um das zu verhindern, sollte Europa seinen terrestrischen Kohlenstoff-Fußabdruck weitestmöglich reduzieren – unter anderem, indem es seinen Fleisch- und Milchkonsum drastisch vermindert. Denn beide Lebensmittel haben einen ungünstigen ökologischen Fußabdruck. Europäer konsumieren im Schnitt viermal so viel Fleisch und Milch wie Einwohner ärmerer Staaten. Da Letztere im Jahr 2050 voraussichtlich rund 60 Prozent der Weltbevölkerung stellen, wird der Fleisch- und Milchverbrauch heutiger Schwellenländer künftig deutlich zunehmen. Europa sollte sich diesbezüglich einschränken, um die Entwicklung anderswo auszugleichen.

Zu der irrigen Vorstellung, Europa verfüge über freie Anbauflächen, trägt ebenso bei, dass die EU einen Großteil ihrer Agrarwirtschaft auslagert. Während die EU-Staaten ihre eigenen Waldgebiete zwischen 1990 und 2014 um 13 Millionen Hektar vergrößert haben, importierten sie massenhaft Agrarprodukte und trieben damit die Entwaldung außerhalb Europas voran – hauptsächlich in den Tropen. Freilich gehen nicht alle europäischen Importe mit aktuellen Rodungen einher; manche stammen von landwirtschaftlichen Flächen im Ausland, die schon vor längerer Zeit in Anbaugelände umgewandelt wurden. Umgekehrt »rettet« der Kontinent auch Flächen anderer Weltregionen im Zuge seiner Lebensmittelexporte. All

**BEDROHTE VIELFALT** Der geplante Ausbau der Bioenergie gefährdet Ökosysteme. Ein Großteil des artenreichen europäischen Graslands könnte verloren gehen, um Platz für Energiepflanzen zu schaffen.



dies muss man in entsprechenden Bilanzrechnungen berücksichtigen. Wenn wir das tun, kommen wir zu dem Ergebnis: Auf je vier Hektar Anbaufläche in Europa beansprucht der Kontinent einen Hektar im Ausland.

Um abzuschätzen, wie sich das auf die Kohlenstoffbilanz auswirkt, haben wir für die europäischen Im- und Exporte die so genannten Kohlenstoff-Opportunitätskosten ermittelt. Das ist die Kohlenstoffmenge, die jährlich in den Ökosystemen verloren geht, um eine Tonne des jeweiligen pflanzlichen oder tierischen Erzeugnisses herzustellen – geteilt durch (quasi »abgeschrieben über«) etwa 35 Jahre. Die Kohlenstoff-Opportunitätskosten sind ein Maß dafür, wie viel Kohlenstoff weltweit eingelagert und somit klimaneutral bliebe, wenn die Menschheit eine Tonne des entsprechenden Produkts weniger konsumieren würde.

Laut unseren Berechnungen hatte Europa zwischen den Jahren 2012 und 2020 ein enormes terrestrisches Kohlenstoff-Handelsdefizit. Das bedeutet, auf Grund seiner landwirtschaftlichen Importe verursachte der Kontinent mehr Treibhausgasemissionen im Ausland, als er im Zuge seiner Exporte dort einzusparen half. Dieses Defizit betrug rund 400 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente (MtCO<sub>2</sub>e) pro Jahr und überstieg damit deutlich die jährliche Kohlenstoffeinlagerung von geschätzt 300 MtCO<sub>2</sub>e, die Europa seinen heimischen Ökosystemen verdankt. Gemäß dem Kyoto-Protokoll sollte Europa die vermehrt Kohlenstoff bindende Wirkung seiner Wälder ohnehin nicht für sich verbuchen: Sie beruht hauptsächlich auf Düngung infolge erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalts, auf gestiegenen Temperaturen und dem Nachwachsen von Wäldern, die es schon vor 1990 gab – also auf Faktoren, die nichts mit Klimaschutzmaßnahmen zu tun haben.

Zusammengefasst heißt das: Europa verfügt keineswegs über freie Flächen, um Energiepflanzen anzubauen. Das Gegenteil trifft zu. Zwecks Einhaltung der Klimaschutzziele muss der Kontinent entweder weitere Gebiete renaturieren, um dort die natürliche Kohlenstoffeinlagerung zu fördern. Oder er muss auf diesen Flächen land- und forstwirtschaftliche Erzeugnisse produzieren, mit denen er das Ausland beliefert, damit dort Anbaugelände frei werden.

### Mehr Natur dank weniger Fleisch

Zum Glück hat Europa die Möglichkeit, entsprechend umzusteuern. Unsere Modellrechnungen belegen: Der Kontinent kann seine landwirtschaftlichen Anbauflächen bis 2050 um 17 Millionen Hektar reduzieren und gleichzeitig sein terrestrisches Kohlenstoff-Handelsdefizit nahezu vollständig abbauen. Um dies zu erreichen, muss Europa konsequent die Erträge im Agrarsektor steigern sowie seinen Biokraftstoffkonsum auf das Niveau von 2010 senken.

Würde die EU ihren Pro-Kopf-Verbrauch an tierischen Produkten um 17 Prozent mindern – das erscheint gerecht angesichts des derzeitigen Konsums und einer weltweit erforderlichen Reduzierung um 10 Prozent –, könnte sie rund 30 Prozent ihrer landwirtschaftlichen Anbaugelände



**ENERGIEWALD** Schnell wachsende Gehölze wie Weiden dienen zunehmend als Energiepflanzen. In großer Dichte angebaut, liefern sie bereits nach kurzer Zeit sehr viel Biomasse.

ALAMY / NEWS PICS

frei geben. Das entspräche 28 Millionen Hektar und käme fast der Fläche Polens gleich. Diese Gebiete ließen sich auf dreierlei Weise für den Klimaschutz und die Erhaltung der Biodiversität nutzen.

Erstens könnte Europa mehr Nahrungsmittel anbauen, um sie zu exportieren beziehungsweise weniger davon zu importieren, und so sein terrestrisches Kohlenstoff-Handelsdefizit in einen Überschuss verwandeln. Wegen der höheren Erträge beansprucht die landwirtschaftliche Produktion in der EU weniger Land als in den meisten anderen Weltregionen. Sie verursacht somit geringere Kohlenstoffverluste in den Ökosystemen. Hinzu kommt: Habitate in den Tropen sind im Allgemeinen artenreicher als solche in Europa; sie naturnah zu belassen, lohnt sich deshalb mehr.

Zweitens könnte die EU die natürlichen Kohlenstoffspeicher auf ihrem eigenen Territorium fördern. Priorität hat hier die Wiedervernässung austrocknender Feuchtgebiete, da Letztere mindestens 100 MtCO<sub>2</sub>e pro Jahr emittieren – vielleicht sogar doppelt so viel. Ältere Wälder vor Holzeinschlag zu schützen, ist ebenfalls wichtig, sowohl für die Kohlenstoffbilanz als auch für die Artenvielfalt. Schnell wachsende Bäume auf ehemaligem Ackerland anzupflanzen, kann die Holzversorgung sicherstellen.



viermal so viel Holz wie heute für Bioenergie importieren. Zudem werden 17 Millionen Hektar Ackerland für Nahrungs- und Futtermittel verloren gehen. Ungefähr die Hälfte des naturnahen europäischen Graslands wird laut den Modellrechnungen weichen müssen, um Energiepflanzen oder intensiv bewirtschafteten Wäldern Platz zu machen. Insgesamt bedeutet der Plan einen Verlust von natürlichen Habitaten und Kohlenstoffspeichern in Europa und eine fortgesetzte oder sogar verstärkte Auslagerung des Kohlenstoff-Fußabdrucks ins Ausland.

Ein vorgeschlagenes EU-Gesetz gegen die Entwaldung wird daran nicht grundsätzlich etwas ändern. Es wird die Einfuhr einiger Waren wie Sojabohnen und Rindfleisch verbieten, die auf neu abgeholzten Flächen produziert werden. Solange Europa allerdings weiterhin bestehende Anbaugelände im Ausland beansprucht oder dies sogar in erhöhtem Maß tut, etwa indem es seine Holzimporte ausweitet, muss die globale landwirtschaftliche Nutzfläche expandieren. Es sei denn, andere Länder reduzieren ihren Fußabdruck und gleichen damit entsprechend aus – was eine unrealistische Annahme ist.

### Land zu nutzen, hat in jedem Fall ökologische Folgen

Generell verlagern Renaturierungsprojekte in Europa zwangsläufig den Kohlenstoff-Fußabdruck ins Ausland, wenn die EU zugleich ihren Bioenergiesektor ausbaut. Denn mehr Anbaugelände für Energiepflanzen bedeuten weniger Flächen für die Renaturierung und umgekehrt. Energiepflanzenplantagen bieten häufigen Arten zwar besseren Lebensraum als einjährige Ackerkulturen. Seltene Pflanzen, Schmetterlinge und Vögel aber finden auf ihnen weniger geeignete Habitate vor als auf naturnahem Grasland. Die weitgehende Entnahme eingeschlagenen Holzes aus bewirtschafteten Wäldern, um daraus Bioenergie zu gewinnen, konterkariert das Ziel, seltenen Arten mehr Totholz als Lebensraum zu überlassen.

Warum will die EU die Bioenergie überhaupt so stark fördern? Weil sie überzeugt ist, dass sich die Treibhausgasemissionen verringern lassen, indem man fossile Brennstoffe durch nachwachsende Biomasse ersetzt. Sie ignoriert jedoch die Folgen verstärkter Landnutzung, indem sie Bioenergie gesetzlich als »kohlenstoffneutral« behandelt. Das heißt: Werden beim Herstellen von Biokraftstoffen fossile Energieträger verfeuert, gelten die dabei freigesetzten Treibhausgase als Emission – die Klimagase dagegen, die das Verfeuern und Raffinieren von Biomasse freisetzt, zählen nicht.

Leider lässt dieser Ansatz die Opportunitätskosten von landwirtschaftlichen Anbauflächen und Holz außer Acht. Meist heißt es schlicht, die bei der Biomasseverbrennung entstehenden Emissionen würden dadurch ausgeglichen, dass angebaute Energiepflanzen wieder Kohlenstoff aus der Luft ziehen. Pflanzenanbau erfordert aber Land. Nutzt man fruchtbare Böden für Energiepflanzenplantagen, kann an darauf keine Nahrungsmittel erzeugen, was den Druck erhöht, weiteres Land in Ackerflächen umzuwandeln. Und mehr Holz für den Bioenergiesektor

Drittens könnte Europa daran arbeiten, seine natürlichen Habitate wiederherzustellen. Von den Populationen der meisten bedeutenden europäischen Arten haben 30 bis 70 Prozent einen Erhaltungszustand von »schlecht« oder schlimmer. Die Biodiversität lässt sich zuvorderst dadurch bewahren, dass man die verbliebenen Lebensräume seltener Spezies schützt sowie die 20 bis 30 Millionen Hektar artenreiches, naturnahes Grasland erhält.

Ebenso könnte sich die EU für eine Mischung dieser Strategien entscheiden. Doch sie alle erfordern einen verkleinerten terrestrischen Kohlenstoff-Fußabdruck.

Die Europäische Kommission behauptet zwar etwas anderes, aber de facto opfert sie mit ihrem Plan »Fit for 55« natürliche Kohlenstoffspeicher und biologische Vielfalt für eine ausgeweitete Versorgung mit Bioenergie. Ihre eigenen Modellrechnungen sagen voraus, dass sich die jährliche Nutzung dieser Energieart zwischen 2015 und 2050 mehr als verdoppeln wird – von 152 Millionen auf 336 Millionen Tonnen Erdöl-Äquivalente. So viel Bioenergie bereitzustellen, würde Jahr für Jahr eine Biomassemenge erfordern, die doppelt so groß wäre wie die gesamte derzeitige Holzernte in Europa – und achtmal so groß wie der Anteil jener Ernte, der heute als Bioenergie-lieferant dient.

Die Modellrechnungen der Kommission gehen dementsprechend von erheblichen ökologischen Folgen aus. Ihnen zufolge wird Europa im Jahr 2050 rund 22 Millionen Hektar für Energiepflanzen beanspruchen, was etwa einem Fünftel der gesamten Anbaufläche entspräche, und

bedeutet weniger davon (und damit weniger Kohlenstoff) in den Wäldern. Land ist nicht kostenlos.

»Fit for 55« schlägt denn auch gewisse Beschränkungen für die Biomasseproduktion vor. So soll die Herstellung aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen etwa auf dem Niveau von 2020 bleiben. Zudem verliert Biomasse den Status »kohlenstoffneutral«, wenn sie auf frisch gerodeten Waldflächen produziert oder bestimmten Primärwäldern entnommen wird. Energiepflanzen hingegen, die auf bestehenden Anbauflächen wachsen, sowie Holzeinschlag aus den meisten anderen Waldgebieten der Erde gelten als kohlenstoffneutral.

Die Kommission meint, nachgeschärfte Regeln zur Landnutzung könnten das Problem auffangen. Diese Vorschriften verlangen von den Ländern, Waldregionen, die als Kohlenstoffsinken fungieren, in bescheidenem Umfang auszubauen und einschlägigem Bilanzierungsmisbrauch vorzubeugen. Wenn die Förderung der Bioenergie zu mehr Holzeinschlag in Europa führe, argumentiert die Kommission zu Recht, sollten die damit verbundenen Emissionen in den europäischen Bilanzen ausgewiesen werden.

### Fossile Brennstoffe vermieden und trotzdem Treibhausgase freigesetzt

Verzerrte Anreize bleiben allerdings bestehen, weil Biomasse für die Verbraucher weiterhin als kohlenstoffneutral gilt. Fabriken, Kraftwerke, Fluggesellschaften und Schiffe erhalten Klimagutschriften, sofern sie fossile Brennstoffe durch Biomasse ersetzen – unabhängig von den tatsächlichen Auswirkungen auf die Kohlenstoffspeicher, sei es in Europa oder anderswo. Wenn ein dänisches Kraftwerk rumänisches Holz importiert und verbrennt, könnte Rumänien auf Grund der Vorschriften verpflichtet werden, mehr Klimaschutzmaßnahmen zu ergreifen, um die reduzierte Kohlenstoffspeicherung im eigenen Land zu kompensieren. Davon unbenommen bleibt es für das dänische Kraftwerk lukrativ, mit dieser Praxis fortzufahren, selbst wenn dabei der atmosphärische Kohlenstoffgehalt steigt. Und wenn die neuen Landnutzungsvorschriften Rumänien sowie andere EU-Länder dazu veranlassen, den Holzeinschlag einzuschränken, steigt der Anreiz, ihn auszulagern.

Über lange Zeiträume betrachtet kann Bioenergienutzung dabei helfen, Netto-Kohlenstoffemissionen zu reduzieren. Kurzfristig aber dürfte das Gegenteil eintreten: Mehr Holzeinschlag und verstärktes Umwidmen von Land für Energiepflanzen wird den atmosphärischen Kohlenstoffgehalt erhöhen. Und zwar auf Jahrzehnte hinaus und selbst dann, wenn man die dadurch verminderte Nutzung fossiler Brennstoffe berücksichtigt. Die von der Kommission veröffentlichte »EU-Waldstrategie für 2030« pflichtet der Forschungsliteratur diesbezüglich sogar bei – versteckt in einem einzigen Satz, der sich inmitten dieses langen Dokuments verbirgt.

Der Klimaplan »Fit for 55« zeigt beispielhaft, dass es falsch ist, Biomasse als kohlenstoffneutral und Landnutzung als kostenlos anzusehen. Er teilt Ressourcen

einschließlich Land verschiedenen konkurrierenden Verwendungsarten zu, um Emissionen zu reduzieren. Indem er die Kohlenstoff-Opportunitätskosten ignoriert, die dabei zu beachten wären, garantiert er die ineffiziente Nutzung von Anbauflächen.

Die einfachste Lösung hierfür wäre, dass die EU Biomasse aus Energiepflanzen und Holz nicht mehr als kohlenstoffneutral behandelt. Das Europäische Parlament hat einen Änderungsantrag angenommen, laut dem die Menge an holzartiger Biomasse, die als »kohlenstoffarm« gilt, in jedem EU-Land auf dem Nutzungsniveau von 2020 eingefroren werden soll. Falls diese Maßnahme in den Verhandlungen mit dem EU-Rat nicht einkassiert wird, könnte sie den Schaden begrenzen.

Leider hat das Parlament es versäumt, alle Energiepflanzen unter die gleichen Obergrenzen zu stellen, die für Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen gelten. Solange die EU dieses Problem nicht behebt, wird sie das Umwidmen von Anbauflächen und das Auslagern der Nahrungsmittelproduktion umso stärker fördern, je mehr sie die Nutzung fossiler Brennstoffe einschränkt.

Der beste Ansatz bestünde darin, Kohlenstoff-Opportunitätskosten der Landnutzung konsequent einzubeziehen, wenn man durch Bioenergie bedingte Emissionen ermittelt. Diese Kosten lassen sich der Menge des Kohlenstoffs gleichsetzen, der gespeichert würde, wenn auf den entsprechenden Flächen natürliche Vegetation wüchse. Sinnvoll wäre es, Kohlenstoff-Opportunitätskosten zu nutzen, um die ökologischen Auswirkungen der Nahrungsmittelproduktion einzuschätzen und zwischen verschiedenen Regionen zu vergleichen. Damit würde man anerkennen, dass Landnutzung mit Kosten einhergeht, die in den Bilanzen auftauchen müssen.

Der Schutz des Klimas und die Rettung der biologischen Vielfalt beginnen damit, dass wir Europas terrestrischen Kohlenstoff-Fußabdruck verringern und nicht auslagern. Den europäischen Klimaplan entsprechend anzupassen, wäre daher ökologisch von Vorteil. ◀

### QUELLEN

**Fuchs, R. et al.:** Europe's Green Deal offshores environmental damage to other nations. *Nature* 586, 2020

**Potapov, P. et al.:** Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century. *Nature Food* 3, 2022

**Schmitz, C. et al.:** Land-use change trajectories up to 2050: Insights from a global agro-economic model comparison. *Agricultural Economics* 45, 2014

**Searchinger, T. et al.:** Creating a sustainable food future. World Resources Institute, World Bank & United Nations, 2019

### nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
*Nature* 612, S. 27–30, 2022



# Wie man Primzahlen auf Linie bringt

Eine Kritzelei aus Langeweile enthüllt mysteriöse Primzahl-Diagonalen. Warum sich die Zahlen in den so genannten Ulam-Spiralen derart regelhaft anordnen, weiß jedoch niemand.

» [spektrum.de/artikel/2120766](https://www.spektrum.de/artikel/2120766)

Der Mathematiker Stanisław Ulam ist vor allem als führender Mitarbeiter bei der Entwicklung der ersten Atombombe während des Manhattan-Projekts bekannt. Doch neben dieser sehr konkreten Anwendung hat er sich auch intensiv mit reiner Mathematik beschäftigt. Zum Beispiel mit folgender Funktion:

$$f(n) = an^2 + bn + c$$

Die Erklärung dazu fängt mit Langeweile an. Nicht mit der klischeehaften Langeweile, die viele Menschen zu überkommen scheint, wenn sie auf Formeln stoßen. Sondern der Art von Langeweile, die während langer Sitzungen oder Vorträge auftreten kann. Das ging, so lautet zumindest die Erzählung, auch Ulam so, als er 1963 an einer wissenschaftlichen Konferenz teilnehmen musste. Also begann Ulam, auf seinem Notizblock herumzukritzeln. Er notierte die natürlichen Zahlen entlang einer Spirale: In der Mitte stand die Eins, dann folgten gegen den Uhrzeigersinn spiralförmig die restlichen Werte. Die Primzahlen markierte er und war erstaunt, ein Muster vorzufinden. Überraschend viele waren linienförmig angeordnet und liefen diagonal durch das Bild.

Aus der Kritzelei eines gelangweilten Mathematikers wurde plötzlich eine potenziell spannende Entdeckung. Ulam nutzte einen der ersten elektronischen Computer (den 1957 gebauten MANIAC II), um sein Diagramm um mehrere zehntausend Zahlen zu erweitern. 1964 und 1967 veröffentlichte er zwei Fachartikel dazu. Ihm war schnell klar geworden, dass die Diagonalen in seiner Spirale mit älteren Funden zusammenhängen. Schon Leonhard Euler hatte im 18. Jahrhundert herausgefunden, dass die Formel  $n^2 + n + 17$  für alle natürlichen Zahlen  $n$  zwischen 0 und 15 eine Primzahl liefert – und diese liegen auf Ulams Geraden. Nimmt man stattdessen den Ausdruck  $n^2 - n + 41$ , bekommt



Ulam-Spirale mit blauen Primzahlen

WILL ORRICK / COMMONS WIKIMEDIA  
ORG/WIKI/FILE:ULAM\_2.PNG/  
PUBLIC DOMAIN

man mehr Primzahlen (ebenfalls eine Entdeckung von Euler): Startet man nicht mit 1, sondern mit 41 im Zentrum, ergibt sich auf der Spirale eine durchgehende Diagonale, die aus 40 Primzahlen besteht.

Allgemein lassen sich Geraden in Ulams Spirale mit der abgebildeten Formel beschreiben. Es ist allerdings offensichtlich, dass die Funktion nicht für jede beliebige Kombination von ganzzahligen  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $n$  eine Primzahl liefert. Wäre das so, hätte man damit eine der größten offenen Fragen in der Mathematik gelöst: nämlich die Verteilung dieser unteilbaren Zahlen. Die Spirale von Ulam zeigt jedoch, dass es bestimmte Werte von  $a$ ,  $b$  und  $c$  gibt, für die man mit der Funktion  $f(n)$  deutlich mehr Primzahlen berechnen kann als für andere Zahlenkombinationen.

Ulam selbst fand ein paar derartige Kombinationen. In den folgenden Jahren haben sich Mathematikerinnen und Mathematiker immer wieder mit Ulam-Spiralen (wie sie mittlerweile genannt werden) beschäftigt. Eine abschließende Erklärung für das Muster gibt es bisher aber nicht.

Ulam war nicht der Erste, der auf ein solches Phänomen gestoßen ist. Schon 1932 ordnete der Herpetologe Laurence Klauber Zahlen in Form eines Dreiecks an, mit der 1 an der Spitze. Markiert man dort die Primzahlen, dann liegen sie auch hier häufig auf diagonalen und vertikalen Linien.

Herpetologie ist übrigens kein mathematisches Fachgebiet, sondern die Wissenschaft von Amphibien und Reptilien – Klauber war ein Experte, was Klapperschlangen angeht. Nicht unbedingt die Art der Forschung, bei der mit Erkenntnissen über Primzahlen zu rechnen ist, aber die Kreativität ist in dieser Hinsicht ein wenig wie die Liebe: Sie sieht, frei nach Shakespeare, mit dem Gemüt und nicht mit den Augen – und trifft Mathematiker und Klapperschlangenforscher gleichermaßen.



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

FRANZI SCHÄDE, WWW.FLORIAN-FREISTETTER.A5SHOW.CONTENT.PHP?ID=8/  
CC-BY-SA-4.0 (GEMÄß COMMONS LICENSES/FS/SK/DIGICOLOR)

AUF EINEN BLICK

## Mein Freund, der Computer

- 1** Sprachmodelle wie ChatGPT haben für viele Schlagzeilen gesorgt. Die Fähigkeiten der neuen KI-Software sind beeindruckend: Sie erzeugt unter anderem Texte, erfindet Geschichten und kann programmieren.
- 2** Diese Fortschritte hat nicht nur die wachsende Rechenleistung von Computern ermöglicht, sondern auch eine neue Klasse von neuronalen Netzwerken, so genannte Transformer.
- 3** Die Algorithmen sind wie das Gehirn in der Lage, ihre Aufmerksamkeit auf bestimmte Inhalte zu lenken und so herauszufinden, welche Informationen zusammenhängen.

**KI-KÜNSTLER** Inzwischen können Algorithmen aus schriftlichen Anweisungen Bilder erstellen, wie dieses.

# Was steckt hinter ChatGPT & Co?

Erste Sprachmodelle gab es schon in den 1950er Jahren. Doch erst durch den massiven Zuwachs an Computerleistung sind KI-Technologien wie DeepL und GPT heute in der Lage, menschliche Sprache praktisch fehlerfrei zu verarbeiten und zu produzieren. Entscheidend dabei war die Imitation einer ganz besonderen Fähigkeit unseres Gehirns.

» [spektrum.de/artikel/2120769](https://www.spektrum.de/artikel/2120769)

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



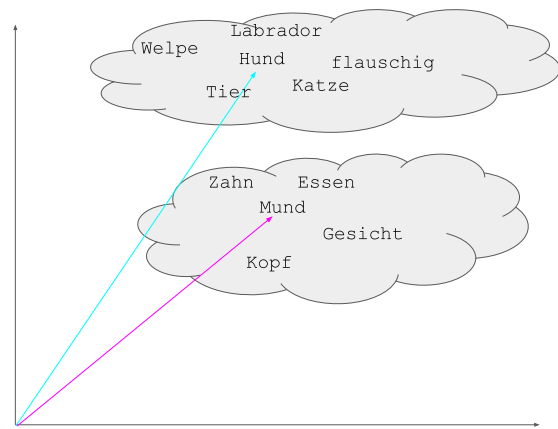
Im Januar 1954 versammelten sich zahlreiche Pressevertreter in einem Raum der Georgetown University, der fast vollständig von einem Computer ausgefüllt wurde: Die IBM-701-Maschine war der erste für wissenschaftliche Zwecke entwickelte Rechner und wog in seiner Gesamtheit knapp zehn Tonnen. Das an sich war schon für viele Anwesende eine Sensation. Doch das überdimensionierte Gerät tat etwas Unvorstellbares: Mit russischen Beispielsätzen gefüttert, druckte es eine ins Englische übersetzte Version aus. »In fünf, vielleicht sogar nur drei Jahren wird sprachübergreifende Übersetzung durch elektronische Verfahren (...) wahrscheinlich möglich sein«, sagte kurz darauf der Linguistiker Leon Dostert, der Leiter des Georgetown-Experiments, das sich maschineller Übersetzung widmete. Inzwischen wissen wir, dass er sich um gut 60 Jahre verschätzt hat.

Erst mit dem Einzug neuronaler Netze in den 2010er und 2020er Jahren wurden die Algorithmen leistungsfähig genug, um Texte verlässlich von einer Sprache in eine andere zu übertragen. »Komplizierte Zusammenhänge werden oft als ›rocket science«, also als ›Raketwissenschaft‹ bezeichnet«, erklärt der Informatiker Aljoscha Burchardt vom Deutschen Forschungszentrum für künstliche Intelligenz (DFKI), der sich mit Sprachtechnologie beschäftigt. »Ich korrigiere die Leute dann oft, sie sollten lieber ›Übersetzungswissenschaft‹ sagen – denn Raketen sind einfach: Um auf den Mond zu fliegen, hat die Menschheit nur etwa zehn Jahre gebraucht.«

In den letzten Monaten haben wir weitere Meilensteine der KI-Technologie erlebt: von Sprachassistenten wie »Siri« oder »Alexa« bis hin zu Algorithmen wie »Dall-E« und »Stable Diffusion«, die aus einer kurzen Beschreibung ein völlig neues Bild erzeugen. All diese Durchbrüche basieren auf Fortschritten der Computerlinguistik. Die höchsten Wellen hat aber wohl der Chat-Assistent »ChatGPT« geschlagen, den die US-amerikanische Softwarefirma OpenAI am 30. November 2022 veröffentlicht hat.

Am sinnvollsten ist es wohl, wenn sich die künstliche Intelligenz selbst vorstellt: Ich bin ChatGPT, das eine und einzige Sprachmodell, mit dem du stundenlang chatten kannst, ohne dass mir langweilig wird, ich müde oder hungrig werde (na ja, vielleicht brauche ich zwischendurch etwas Strom, aber das ist eine andere Geschichte). Ich bin so etwas wie eine Mischung aus einem quasselnden Kumpel, einem superschlauen Lexikon und einem witzigen Komiker – alles in einem! Wenn du dich einsam fühlst, du neugierig bist oder einfach nur Blödsinn machen willst, dann traue dich ruhig und sag »Hallo!« zu deinem neuen Robo-Kumpel. Nur bitte frag mich nicht nach einem Witz über Binärcode, denn der wäre mir zu »0-0-1«-seitig!

Und schon will man natürlich einen solchen Witz hören, woraufhin das System Folgendes ausspuckt: Wie viele Programmierer braucht man, um eine Glühbirne zu wechseln? – Keinen, das ist ein Hardware-Problem! Zugegeben, der ist etwas lahm. Trotzdem ist es erstaun-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

**WORTEINBETTUNG** Eine der schwierigsten Aufgaben beim Erstellen von Sprachmodellen ist, Wörter geeignet darzustellen. Ausdrücke, die sich von der Bedeutung her ähnlich sind, sollen sich auch in ihrer mathematischen Darstellung kaum unterscheiden.

lich, wie gut man sich mit einem Computerprogramm unterhalten kann. »Die KI kreiert tatsächlich neue Inhalte. Witze erfinden ist eine hohe Kunst, die uns ja auch nicht leichtfällt. Dazu braucht man Humor, Empathie, Ironie, Frechheit und so weiter«, sagt Burchardt. Aktuell laufen Studien, um zu untersuchen, wie gut Personen unterscheiden können, ob ein Text von ChatGPT oder einem Menschen generiert wurde. Da die von OpenAI entwickelten Vorgängerversionen aber bereits überzeugende Inhalte lieferten, besteht kaum Zweifel, dass auch ChatGPT gut abschneiden wird.

Dennoch haben die aktuellen Systeme noch erhebliche Schwächen, die in den Medien heiß diskutiert werden. Um nachzuvollziehen, warum die Entwicklung von Sprachmodellen so lange gedauert hat und mit welchen Herausforderungen die Programmiererinnen und Programmierer noch immer kämpfen, muss man die Funktionsweise der Programme verstehen.

Aber vielleicht kann das die KI am besten selbst erklären: Im Großen und Ganzen funktioniert ChatGPT so, dass es als Eingabe eine Aufforderung wie eine Frage oder eine Aussage annimmt und diese Eingabe verwendet, um eine Antwort zu erzeugen. Der erste Schritt besteht darin, die Eingabe in eine numerische Darstellung zu kodieren, die das Netz zur Vorhersage verwenden kann. Dazu werden in der Regel Worteinbettungen verwendet.

Bevor der Chatbot weitermacht, hake ich hier ein, denn das ist schon die erste große Schwierigkeit, mit der sich Fachleute lange herumgeschlagen haben – und immer noch herumgeschlagen. Es geht dabei um den Knackpunkt der Sprachverarbeitung: Wie kann man einer Maschine einen Text möglichst sinnvoll übergeben, damit alle logischen Zusammenhänge klar werden?

Bei Bildern ist die Aufgabe recht schnell gelöst: Man nutzt die Zahlenwerte der Pixel und schreibt sie in eine lange Liste, einen so genannten Vektor. Bei einem Text ist es aber nicht sinnvoll, jedem einzelnen Buchstaben und Satzzeichen einen Wert zuzuschreiben. Denn die eigentlichen Objekte, um die es in der Sprache geht, sind Worte. Deshalb braucht man für sie eine eigene Codierung. Zum Beispiel könnte man die ersten 10 000 Einträge eines Wörterbuchs der Reihe nach von 1 bis 10 000 nummerieren. Wenn man diese in binäre Schreibweise übersetzt, könnte ein Computer problemlos damit umgehen.

Eine solche Worteinbettung hilft jedoch nicht weiter. Es geht schließlich nicht nur darum, Inhalten irgendwelche Zahlenwerte zuzuordnen: Man möchte, dass ähnliche Objekte sich in ihrer mathematischen Darstellung nicht allzu stark voneinander unterscheiden. Bei Bildern ist das kein Problem. Wenn man den Wert eines einzigen Pixels ändert, sieht das modifizierte Bild kaum anders aus – und auch der zugehörige Vektor (die Liste der Zahlen) ist recht ähnlich zum ursprünglichen.

Bei Wörtern ist das aber nicht so: Nimmt man kleine Änderungen vor, etwa indem man einen Buchstaben austauscht, hat die Aussage einen völlig neuen Sinn: »Der Hund hat flauschiges Fell« unterscheidet sich deutlich von »Der Mund hat flauschiges Fell«. Zwar sind sich »Hund« und »Mund« von der Schreibweise her recht ähnlich, doch sie unterscheiden sich semantisch. Tatsächlich teilt das Wort »Katze« mehr Gemeinsamkeiten mit »Hund«, obwohl sie keinen einzigen Buchstaben gemeinsam haben. Computerlinguisten brauchen also eine Abbildung, die Wörtern mit einer ähnlichen Bedeutung räumlich nahe Vektoren zuordnet.

Dafür muss man definieren, wann sich zwei Ausdrücke ähneln – etwa wenn sie in gleichen Kontexten auftauchen, wie bei Katze und Hund. Beide erscheinen häufig im Zusammenhang mit Wörtern wie Haustier, Fell, flauschig, füttern und so weiter. Daher ordnet man diesen ähnliche Vektoren zu, während Hund und Mund vermutlich eine größere Entfernung voneinander aufweisen. In manchen Worteinbettungen wird sogar darauf geachtet, dass man simple Arithmetik betreiben kann: Zieht man etwa die Darstellung von »männlich« vom Vektor zu

»König« ab, sollte das Ergebnis zumindest in der Nähe von »Königin« liegen.

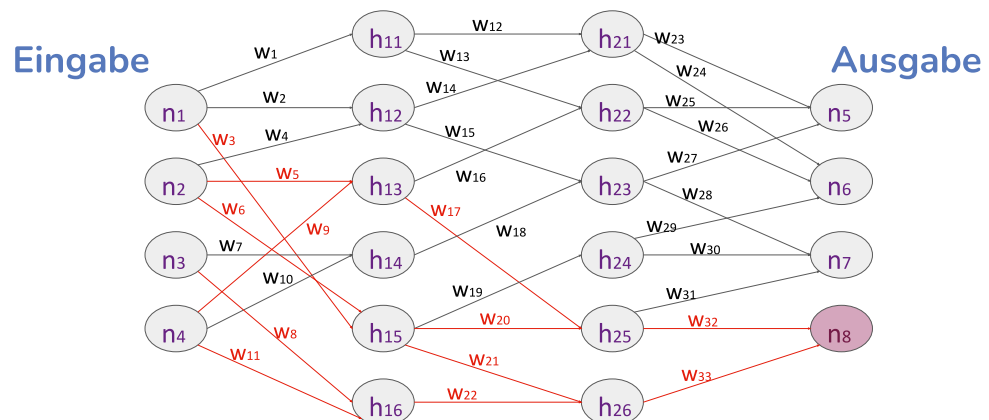
Ist eine geeignete Worteinbettung gefunden, weiß man, welche Worte miteinander in Verbindung stehen – und kann daraus sinnvolle Sätze bilden. Die passende Darstellung ist also der wichtigste Teil der Sprachmodellierung. Um sie zu finden, greift man auf maschinelles Lernen zurück. Mit diesem Ansatz lassen sich Muster in großen Datensätzen identifizieren. Das Gebiet umfasst zahlreiche verschiedene Methoden, anhand derer Algorithmen eigenständig eine Aufgabe erlernen. Die verbreitetsten Techniken basieren aktuell auf neuronalen Netzen. Zwar wurden diese bereits in den 1940er Jahren entwickelt, doch der Ansatz konnte sich erst im letzten Jahrzehnt dank der gestiegenen Leistungsfähigkeit und Speicherkapazitäten von Computern durchsetzen.

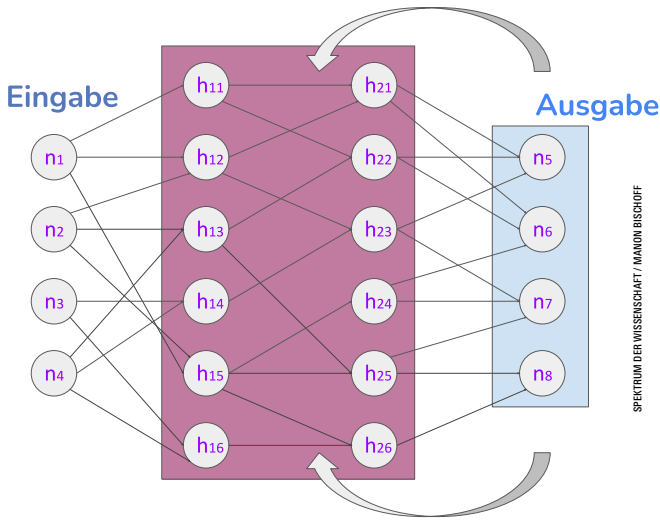
Die Funktionsweise von neuronalen Netzen erklärt ChatGPT folgendermaßen: Neuronale Netze sind eine Art von Algorithmus für maschinelles Lernen, der von der Struktur und Funktion des menschlichen Gehirns inspiriert ist. Sie bestehen aus miteinander verbundenen Knoten oder »Neuronen«, die Informationen verarbeiten und zwischen den Schichten des Netzes weiterleiten. Jedes Neuron empfängt Eingaben von anderen Neuronen, führt an diesen Eingaben eine einfache mathematische Operation durch und leitet das Ergebnis dann an andere Neurone in der nächsten Schicht weiter. Auf diese Weise können neuronale Netze lernen, Muster in Daten zu erkennen und auf der Grundlage dieser Daten Vorhersagen zu treffen.

Doch woher weiß das Netz, wie es die Eingabewerte verarbeiten soll? Anders als bei gewöhnlichen Algorithmen macht ein Programmierer keine eindeutigen Vorgaben (etwa: Falls Neuron 2 aus Schicht 3 ein Signal mit Wert 0,77 erhält, dann wandle es in 0,89 um). Stattdessen lässt man das Netz selbst »lernen«, welche Einstellungen am geeignetsten sind, um eine Aufgabe zu bewältigen.

Möchte man beispielsweise, dass ein neuronales Netz ein bestimmtes Tier auf Bildern erkennt, kann man das Netzwerk mit zahlreichen Beispieldaten füttern: Man

**NEURONALE NETZE**  
Die Algorithmen bestehen aus Recheneinheiten, »Neurone«  $n$  und  $h$ , die durch Gewichte  $w$ , miteinander verbunden sind. Die Ausgabe von  $n_8$  hängt beispielsweise von allen Eingabe-Neuronen ( $n_1$  bis  $n_4$ ) sowie zahlreichen Gewichten (rot) ab.





SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

überträgt die Pixelwerte in die Eingabeschicht, lässt den Algorithmus zu einem Ergebnis (etwa »Katze« oder »Hund«) kommen und vergleicht dieses mit dem korrekten Resultat. Anfangs wird das Programm eher schlecht funktionieren. Aber es wird bei jedem Durchlauf versuchen, sich zu verbessern. Wenn es zu einem falschen Schluss kommt, passt es die relevanten Verbindungen zwischen den Neuronen an, die zu dem fehlerhaften Ergebnis geführt haben, damit die Ausgabe künftig richtiger ausfällt. Indem das Programm sich durch weitere Daten immer wieder nachjustiert, wird es schrittweise besser. Am Ende des Trainings sollte es in der Lage sein, auch solche Bilder richtig zu klassifizieren, die es noch nie zuvor gesehen hat.

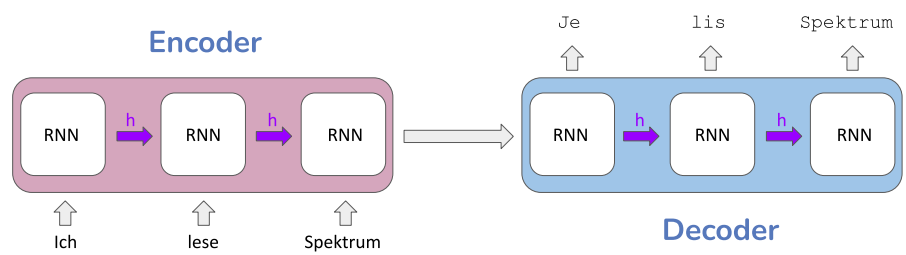
Das funktioniert sogar mit unbeschrifteten Daten: So kann eine KI Muster erkennen, ohne dass man ihr etwas vorgibt. Dafür braucht man viele Daten; in den Worten

**REKURRENTES NEURONALES NETZ** Bei dieser Art von Algorithmen wird Information nicht nur von links nach rechts übertragen, sondern die Neuronenschichten können die Daten auch in zurückliegende Schichten übertragen. Das verleiht den Netzwerken eine Art Gedächtnis.

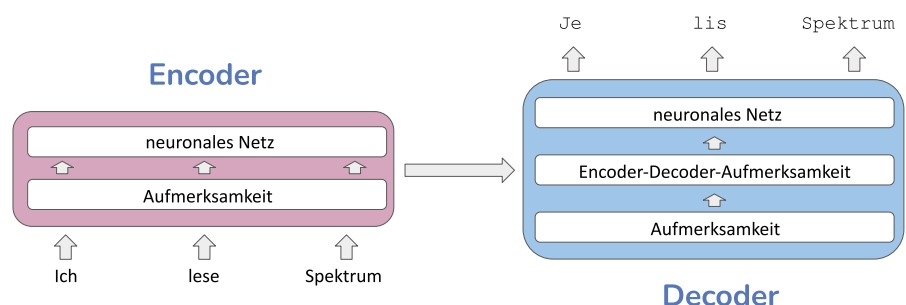
von ChatGPT: etwa eine Sammlung von Dokumenten, Webseiten oder Beiträgen in sozialen Medien. Mit diesem Korpus wird ein Vokabular von Wörtern erstellt, die zur Erzeugung der Einbettungen verwendet werden. Anschließend wird ein neuronales Netzwerk trainiert, um die Wahrscheinlichkeit vorherzusagen, mit der jedes Wort aus dem Vokabular in einem bestimmten Kontext vorkommt. Der Kontext eines Wortes bezieht sich auf die Wörter, die vor und nach ihm in einem Satz oder Absatz erscheinen.

Konkret bedeutet das: Man nimmt Teile der Trainingsdaten, etwa den ersten Satz zu »Spektrum der Wissenschaft« bei Wikipedia (»Spektrum der Wissenschaft ist eine populärwissenschaftliche Monatszeitschrift«) und übergibt dem neuronalen Netz nur einen Teil davon, beispielsweise: »Spektrum der Wissenschaft ist eine populärwissenschaftliche ...« und lässt den Algorithmus das nächste Wort vorhersagen. Am Anfang des Trainings wird das wohl nicht besonders gut funktionieren und womöglich etwas Unpassendes liefern, woraufhin das System seine inneren Parameter (die Gewichte) anpasst und dadurch schrittweise besser wird. Sobald das Netz trainiert ist, können die Gewichte seiner Verbindungen als Worteinbettungen verwendet werden. Jedes Wort im Vokabular wird durch einen Vektor dargestellt, der die Beziehungen zwischen dem Wort und den anderen Wörtern im Korpus erfasst.

**ENCODER UND DECODER** Viele Sprachmodelle bestehen aus zwei separaten Strukturen. Der Encoder sammelt die Informationen der Eingabe, indem er Wort für Wort verarbeitet und dabei jeweils einen »inneren Vektor«  $h$  aktualisiert. Anschließend wird dieser an den Decoder weitergegeben, der daraus beispielsweise eine Übersetzung erzeugt.

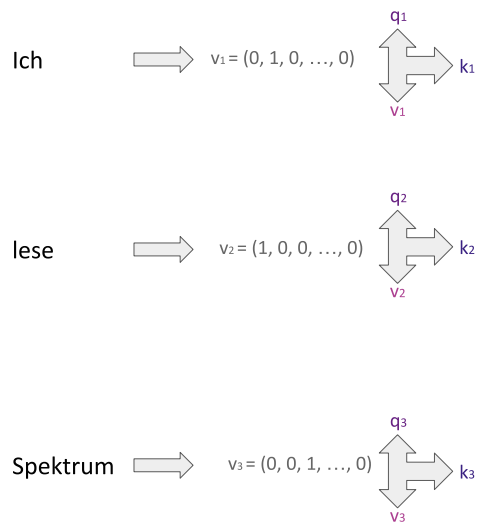


**TRANSFORMER** Diese Art von neuronalem Netz hat die Sprachverarbeitung erheblich verbessert. Denn durch einen »Aufmerksamkeitsmechanismus« bringen die Strukturen alle eingegebenen Inhalte miteinander in Verbindung – unabhängig von ihrer Distanz zueinander.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

**AUFMERKSAMKEITS-MECHANISMUS** Der grundlegende Mechanismus erinnert an Methoden aus dem Dokumenten-Retrieval: Um herauszufinden, welche Worte zusammenhängen, ordnet man jedem einen Schlüssel-, Werte- und Anfragevektor zu und verrechnet sie miteinander.



Suche: Anfrage q



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANION BISCHOFF

Um ein System zu entwerfen, das natürliche Sprache verarbeitet, zum Beispiel Texte generiert oder übersetzt, nutzt man inzwischen oft zwei neuronale

Netze: Einen »Encoder« und einen »Decoder«. Ersterer wandelt die Wörter in die passenden Vektoren um, ist also eine Art Worteinbettung, während der zweite aus dieser Darstellung eine Ausgabe erzeugt: eine möglichst passende Vervollständigung der Eingabe oder eine Übersetzung.

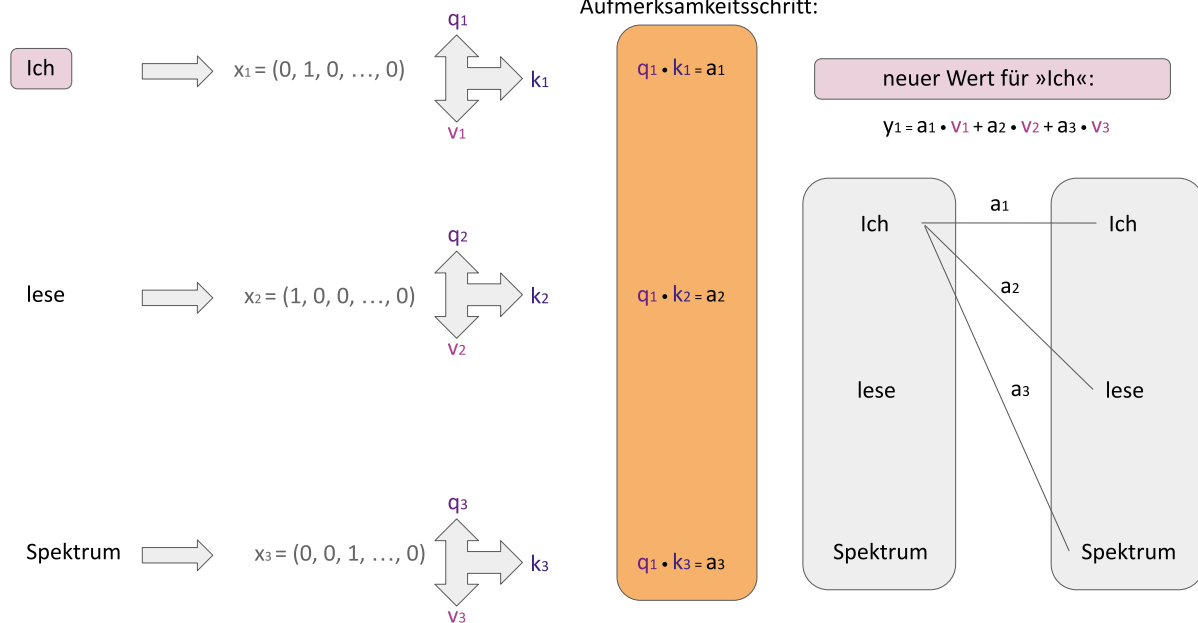
Es gibt aber nicht nur viele verschiedene Algorithmen des maschinellen Lernens, sondern auch zahlreiche unterschiedliche Arten von neuronalen Netzen, die sich durch ihre Struktur teilweise stark voneinander unterscheiden. Je nach Aufgabe, die sie bewältigen sollen, entscheidet man sich etwa für ein vorwärtsgerichtetes neuronales Netz, ein Faltungsnetzwerk oder ein rekurrentes neuronales Netz. Ersteres bezeichnet die einfachste Form von Netzwerken, bei der die Information ganz klassisch von hinten (Eingabe) nach vorne (Ausgabe) verarbeitet wird. Zu dieser Klasse gehören auch Faltungsnetzwerke, die häufig in der Bildverarbeitung genutzt werden: Die einzelnen Neuronenschichten wirken dabei wie Filter, die dazu dienen, bestimmte Merkmale herauszusieben – etwa die Kontur eines abgebildeten Motivs. Rekurrente neuronale Netze enthalten hingegen Schleifen, was den Algorithmen eine Art Gedächtnis verleiht. Das heißt konkret: Die künstlichen Neurone einer Schicht können nicht nur mit den kommenden Schichten verbunden sein, sondern auch mit Recheneinheiten derselben oder von vorangegangenen Schichten. Das erweist sich vor allem bei der Sprachverarbeitung als nützlich.

Angenommen, man hat ein bereits trainiertes rekurrentes neuronales Netz, dem man einen Satz übergeben möchte, damit es ihn übersetzt. Der Algorithmus verarbeitet die einzelnen Wörter nacheinander. Zunächst widmet das Netz sich dem ersten Wort, indem es den Zustand der inneren Schichten in einem »inneren Vektor« speichert: Dieser enthält relevante Merkmale der Eingabe (ist sie ein Nomen, welchen Kontext hat sie und so fort). Anschließend übergibt man dem Netz das zweite Wort, das es zusammen mit dem zuvor berechneten inneren Vektor verarbeitet. Das Programm verändert daraufhin

den inneren Vektor, der dann zusammen mit dem dritten Wort bearbeitet wird und so weiter. Damit sammelt das Netz Informationen von mehreren Inhalten, indem es den inneren Vektor immer wieder aktualisiert. Wenn die Eingabe beendet ist, sendet der Encoder diesen Vektor an den Decoder, der daraus schließlich eine Ausgabe macht: etwa einen neuen Satz oder eine übersetzte Aussage.

Traditionelle maschinelle Übersetzungsprogramme wie »Google Translate« basieren auf solchen rekurrenten neuronalen Netzen. Allerdings haben diese Systeme Einschränkungen: Sie können keine langen Dateneingaben verarbeiten. Denn die Informationen, die in den inneren Vektoren gespeichert werden, gehen nach mehrmaligem Aktualisieren irgendwann verloren. Wenn etwa zwei Wörter innerhalb eines Abschnitts aufeinander Bezug nehmen und weit voneinander entfernt sind, kann das Programm das meist nicht mehr erkennen. Zum Beispiel ist ein Mensch in der Lage, den Satz »Ich bin in Frankreich geboren, in einem kleinen Dorf mit etwa 300 Einwohnern. Ich spreche daher fließend ...« zu vervollständigen. Ein rekurrentes neuronales Netz wird damit aber höchstwahrscheinlich Probleme haben, da die relevante Information (»in Frankreich geboren«) ganz am Anfang des ersten Satzes steht – und bis zur Lücke 13 weitere Worte verarbeitet werden.

Das ist nicht nur zur Erzeugung von Texten hinderlich, sondern auch bei maschinellen Übersetzungen. Denn gerade um Personalpronomen richtig in eine andere Sprache zu übertragen, muss man wissen, worauf sie sich beziehen. Selbst wenn es Tricks gibt, um rekurrente Netze zu verbessern, scheitern sie bei längeren Eingaben. Ein weiterer Nachteil ist, dass sich die Rechenschritte nicht parallelisieren lassen: Ein Computer kann die Inhalte nur Wort für Wort verarbeiten – man kann den Prozess nicht beschleunigen, indem man mehrere Rechner zusammenschaltet. Inzwischen hat sich daher ein neuer Ansatz durchgesetzt, den erfolgreiche Software wie das maschinelle Übersetzungsprogramm »DeepL« und die GPT-Algorithmen verwenden: Transformer.



**BEDEUTUNG DER EINZELNEN WÖRTER FÜREINANDER** Indem man jedes Wort einer Eingabe mit allen anderen vergleicht, können Sprachmodelle nun auch längere Inhalte verarbeiten.

Der Umbruch kam mit einer Arbeit, die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Google Brain 2017 veröffentlicht haben: »Attention is all you need.« Dabei orientierten sie sich an einer Besonderheit der Funktionsweise unseres Gehirns: Aufmerksamkeit. Glücklicherweise nehmen wir nicht jedes Signal unserer Umgebung wahr, sondern richten die Aufmerksamkeit gezielt auf Dinge, die wichtig für uns sind. Zum Beispiel interessiert es uns während des Autofahrens nicht, ob an einem Busch auf dem Gehweg ein Blatt raschelt – aber wir müssen blitzschnell reagieren, wenn ein Fahrzeug vor uns plötzlich bremst. Das Gehirn filtert unentwegt unsere Sinneseindrücke und lenkt die Aufmerksamkeit auf für uns relevante Signale. Diesen Mechanismus versuchen Transformer-Netzwerke zu übernehmen – und das macht sie so überlegen.

Wieder einmal steht die richtige Worteinbettung im Vordergrund: Ziel eines Transformers ist es, alle relevanten Informationen einer Eingabe zu erfassen und die Wörter entsprechend zu codieren. Die Programme bestehen gewöhnlicherweise ebenfalls aus einem Encoder und einem Decoder.

Möchte man etwa ein maschinelles Übersetzungsprogramm trainieren, übergibt man dem System zahlreiche deutschsprachige Sätze mit den französischen Gegenstücken. Der Encoder verarbeitet dann die deutschen Teile, während sich der Decoder den französischen widmet. Bei einem Sprachmodell, das Texte vervollständigt und neue Inhalte erzeugt, werden hingegen beide Seiten in der gleichen Sprache trainiert.

Das Training eines Transformers ist extrem aufwändig: In der Regel müssen Hochleistungsrechner mehrere Wochen lang auf Hochtouren laufen, um all die Daten zu verarbeiten. Wie drei Forscherinnen und Forscher 2019 berechnet haben, verbraucht das Training großer Sprachmodelle ebenso viel Treibhausgas wie fünf Autos während ihrer Lebensdauer.

Im Gegensatz zu rekurrenten neuronalen Netzen verarbeitet ein Transformer die gesamte Eingabe gleichzeitig – schließlich könnte ein Wort am Anfang des Texts drei Sätze später relevant sein. Deshalb setzt ein solches Netzwerk alle Inhalte zueinander in Bezug und versucht herauszufinden, was wie miteinander zusammenhängt.

Dafür überführt das Programm die einzelnen Wörter zunächst in passende Vektoren. Die benötigte Worteinbettung hat die KI während des Trainings gelernt. Auch wenn sich aus der Darstellung bereits grammatikalisch korrekte Sätze bilden lassen, berücksichtigt das Netzwerk noch nicht die semantischen Zusammenhänge der Eingabe. Um zu »verstehen«, was die übergebenen Inhalte bedeuten, muss man die einzelnen Wörter miteinander verknüpfen – und eine neue mathematische Darstellung erzeugen.

Das ermöglicht der Aufmerksamkeitsmechanismus. Dafür haben die Informatikerinnen und Informatiker von Google Brain eine Methode genutzt, die beim Durchforsten von Dokumenten in Rechensystemen zum Einsatz kommt – etwa, wenn man im Suchfenster von YouTube einen Begriff eingibt und die Webseite die dazu passendsten Videos heraussucht. Ein Nutzer stellt eine Abfrage und das System durchsucht den Speicher anhand von Schlüsselwörtern, die den tatsächlichen Inhalt eines Dokuments codieren.

Ähnlich geht man auch beim Aufmerksamkeitsmechanismus vor: Man ordnet zunächst jedem Wort einen



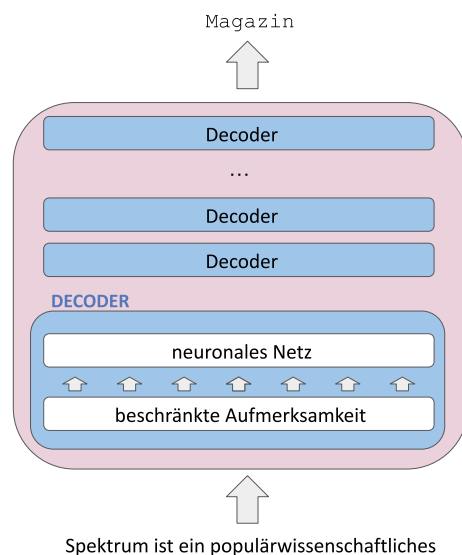
Abfrage-, Schlüssel- und Wertevektor zu. Sie werden berechnet, indem man die ursprüngliche Wortdarstellung (ein Vektor) mit drei unterschiedlichen Matrizen multipliziert: einer Abfrage-, einer Schlüssel- und einer Wertematrix, deren Einträge das Transformer-Netzwerk durch das Training bestimmt hat.

Mit Hilfe dieser drei Vektoren kann man jedes Wort mit allen anderen in Beziehung setzen – und auf diese Weise herausfinden, welchen Inhalten man besonders viel Aufmerksamkeit schenken sollte und welche Eingaben wie zusammenhängen. Das Ganze kann man sich wie eine Suche in einem Aktenschrank vorstellen: Sie schreiben eine kurze Notiz mit einem Suchbegriff auf (Abfragevektor). Den gleichen Sie mit den Aufklebern (Schlüsselvektoren) auf den Akten ab, die Sie durchsuchen. Wenn Aufkleber und Akte gut zusammenpassen, entnehmen sie Letzterer den Inhalt (Wertevektor). Damit lässt sich bewerten, wie gut die Abfrage (das erste Wort des Satzes) zu den jeweiligen Ordnern (der gesamten Eingabe) passt.

Aus mathematischer Sicht geschieht folgendes: Angenommen, Sie übergeben dem Algorithmus: »Ich lese das Spektrum-Heft, weil es mir gefällt.« Menschen wissen, dass sich das Pronom »es« auf »Heft« bezieht. Damit der Transformer das auch erkennt, verwandelt es jedes Wort zunächst in einen hochdimensionalen Vektor mit mehreren hundert Einträgen. Diesen multipliziert er dann mit den Abfrage-, Schlüssel- und Wertematrizen. Anschließend nimmt er sich die Bestandteile des Satzes einzeln vor: Er startet mit »Ich« und möchte es mit den anderen Inhalten in Zusammenhang setzen. Also beginnt man mit dem Abfragevektor (Notizzettel) von »Ich« und vergleicht ihn mit den Schlüsselvektoren (Aufklebern auf den Akten) der gesamten Eingabe (»Ich«, »lese«, »das« und so weiter). Dafür bildet man das Skalarprodukt aus beiden Vektoren, wodurch eine Zahl entsteht. Letztere dient als Maß dafür, wie ähnlich sich zwei Vektoren sind, also wie gut die Suchanfrage zu den Klebezetteln passt.

Im echten Leben würde man vielleicht nur die ersten paar Akten öffnen, die besonders gut abschneiden. Dem Computer muten wir allerdings mehr Arbeit zu. Er berücksichtigt die Wertevektoren aller Inhalte, schenkt ihnen jedoch nur ein gewisses Maß an Aufmerksamkeit,

**DECODER-ONLY-ARCHITEKTUR**  
Sprachmodelle wie GPT bestehen nur aus Decodern – auf Encoder wurde verzichtet.



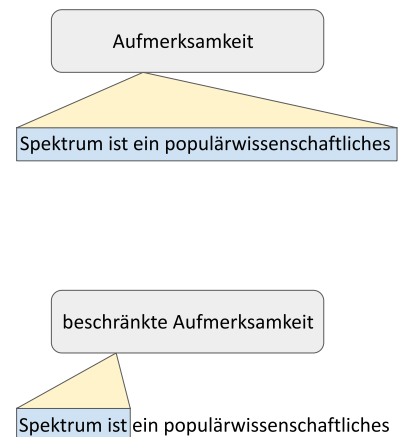
das vom zuvor berechneten Skalarprodukt abhängt. Das heißt: Wenn das Produkt aus der Abfrage von »Ich« und dem Schlüssel von »weil« 0,003 ergibt, dann multipliziert man 0,003 mit dem Wertevektor »weil« – die Aufmerksamkeit auf »weil« fällt daher eher klein aus.

All diese Arbeit soll zu einer besseren Darstellung der eingegebenen Wörter führen – und zwar eine, die den Inhalt des Satzes berücksichtigt. Der neue Vektor für »Ich« ergibt sich beispielsweise, indem man alle gewichteten Wertevektoren summiert, also zum Beispiel: 0,67-mal den Wertevektor von »Ich« plus 0,12-mal den Wertevektor von »lese« und so weiter. Damit enthält die neue Darstellung von »Ich« alle für das Wort relevanten Informationen der Eingabe.

Der Vorteil: Man muss nicht jedes Wort nacheinander verarbeiten, sondern die Aufgabe lässt sich parallelisieren. Eine Recheneinheit kann die Darstellung des ersten Worts durch den Aufmerksamkeitsmechanismus ermitteln, während sich eine zweite Einheit zeitgleich dem zweiten Wort widmet und so weiter. Anders als bei rekurrenten neuronalen Netzen kann man eine Eingabe damit wesentlich schneller verarbeiten.

Die auf diese Weise neu erhaltenen Vektoren werden anschließend durch ein vorwärtsgerichtetes neuronales Netz geschickt, das die Objekte in eine passende Darstellung für die weitere Bearbeitung umwandelt. Den Zyklus aus Aufmerksamkeit und vorwärtsgerichtetem neuronalen Netz durchläuft die Eingabe mehrmals: Sie passiert unterschiedliche Encoder-Strukturen mit jeweils eigenen Parametern. So kann der Transformer bei jedem Aufmerksamkeitschritt auf verschiedene sprachwissenschaftliche Eigenschaften achten. Am Ende spuckt der Encoder zu jedem Wort einen Darstellungsvektor aus sowie die dazugehörigen Schlüssel- und Wertevektoren, die für die weitere Verarbeitung im Decoder relevant sind.

Der Decoder funktioniert ähnlich wie der Encoder. Zunächst verarbeitet er bloß die übergebenen Darstellungsvektoren. Auch er führt einen Aufmerksamkeits-



mechanismus durch: Er ordnet den Vektoren Abfrage-, Schlüssel- und Wertevektoren zu. Die entsprechenden Matrizen, aus denen er diese Größen erzeugt, unterscheiden sich allerdings von jenen im Encoder – in dem Fall sind sie für die Aufgabe optimiert, die der Transformer erledigen soll: etwa die Eingabe übersetzen oder einen Satz vervollständigen.

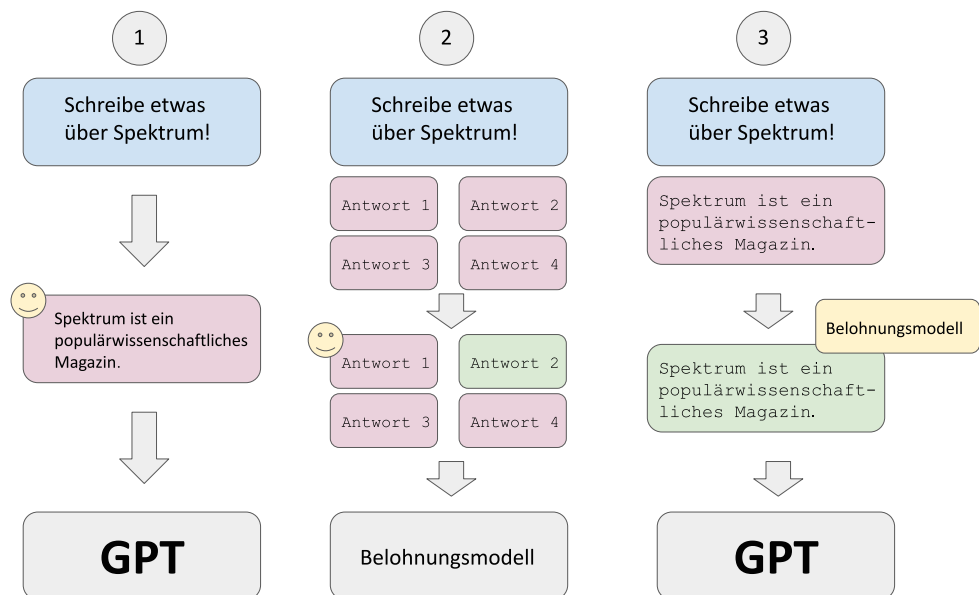
Der Aufmerksamkeitsmechanismus läuft im Decoder hingegen ein wenig anders ab. Wenn man beispielsweise »Ich lese Spektrum« ins Französische übertragen möchte, beginnt das Netzwerk mit »je« und ignoriert zunächst die übrigen französischen Wörter, die sich durch eine Übersetzung ergeben. Der Decoder untersucht also nur, wie ein Wort mit den vorhergehenden Eingaben zusammenhängt. Bearbeitet das Netz hingegen gerade »lese«, beachtet der Algorithmus sowohl »lis« als auch »je«. Grund dafür ist vor allem das Training: Wenn der Decoder in der Lage wäre, die kommenden Inhalte des Trainingsdatensatzes einzusehen, könnte er »abgucken« und die Ergebnisse einfach »abschreiben«.

Im Anschluss daran gibt es im Decoder einen weiteren Aufmerksamkeitsschritt, bei dem das System die ursprünglichen Eingabewerte berücksichtigt: Die Abfragevektoren stammen aus dem vorangegangenen Decoder-Schritt, die Schlüssel- und Wertevektoren hingegen von der Encoder-Ausgabe. Damit werden zum Beispiel die neu generierten fremdsprachigen Wörter mit der Eingabe abgeglichen – wieder nach dem Prinzip der Aufmerksamkeit, indem die Bedeutung der Vektoren ermittelt wird.

Danach gibt es wie beim Encoder ein vorwärtsgerichtetes neuronales Netz, das die verarbeiteten Vektoren in die passende Form bringt und sie am Ende in Wörter zurück übersetzt. Das Ergebnis sollte dann etwa ein grammatikalisch korrekter Satz in einer anderen Sprache sein – und bestenfalls die Übersetzung der Eingabe.

Die Transformer-Struktur hat sich bewährt: Etwa basiert das Übersetzungsprogramm »DeepL« darauf – obwohl die deutsche Firma DeepL SE nicht die Details des genutzten Modells preisgibt. Als Trainingsdatensatz dienten Inhalte von »Linguee«, einer Datenbank mit übersetzten Satzpaaren in je zwei Sprachen.

**REINFORCEMENT-LEARNING** wurde genutzt, um das Sprachmodell auf passendere Antworten zu menschlichen Abfragen zu trainieren.



Auch Sprachmodelle wie »GPT« (generative pre-trained transformer) von OpenAI oder »LaMDA« (Language Model for Dialogue Applications) von Google verwenden Transformer, um eigenständig Texte zu erzeugen. Allerdings haben diese keine Encoder-Decoder-Struktur, sondern nutzen meist nur eine von beiden. Die GPT-Versionen bestehen beispielsweise bloß aus zahlreichen hintereinander ausgeführten Decodern.

Grundlage für die Vorgehensweise bildete die 2018 veröffentlichte Forschungsarbeit »Generating Wikipedia by Summarizing Long Sequences« von Google Brain. Darin haben die Informatiker gezeigt, dass man keinen Encoder braucht, um sinnvolle Texte zu erzeugen. Die Decoder-Architektur ist recht ähnlich aufgebaut wie die ursprünglich entwickelten Transformer – allerdings kommen sie ohne den zweiten Aufmerksamkeitsschritt aus, der Bezug auf die Encoder-Ausgabe nimmt.

Das heißt konkret: Man kann dem Netzwerk eine Eingabe übergeben, etwa »Spektrum der Wissenschaft ist eine«, woraufhin dieser den Satz vervollständigt – und sogar ein paar Absätze darüber schreibt:

Spektrum der Wissenschaft ist eine deutsche monatlich erscheinende Zeitschrift, die sich mit aktuellen Themen aus den Bereichen Naturwissenschaften, Technik und Medizin beschäftigt. Sie wurde erstmals im Jahr 1978 veröffentlicht und ist seitdem zu einer der bekanntesten und renommiertesten populärwissenschaftlichen Zeitschriften im deutschsprachigen Raum geworden. Das Ziel der Zeitschrift ist es, wissenschaftliche Themen verständlich und anschaulich für ein breites Publikum aufzubereiten und somit zur Verbreitung von wissenschaftlichem Wissen beizutragen.

Um solche Ausgaben zu produzieren, wandelt der Algorithmus eine Eingabe zunächst durch die gelernte



MANNO BIRSCHOFF / ERSTELLT MIT DALL-E

**DALL-E KI kann nicht nur Texte erzeugen, sondern auch Bilder. Dieses »Kunstwerk« ist entstanden, indem man vorgab: »Ein Computer an einem Strand auf einem Liegestuhl unter einer Palme mit einem Cocktail«.**

Worteinbettung in eine vektorielle Darstellung um. Jedes Wort durchläuft anschließend den Aufmerksamkeitsmechanismus, bei dem man je einen Werte-, Abfrage- und Schlüsselvektor bestimmt. Auch in diesem Fall bewertet der Decoder die Bedeutung der einzelnen Inhalte – allerdings vergleicht er ein Wort bloß mit den vorangehenden Eingaben und ignoriert die darauf folgenden. Damit berechnet er eine neue vektorielle Darstellung, die die wichtigsten semantischen Informationen codiert.

Im Anschluss wird die Ausgabe durch ein vorwärtsgerichtetes neuronales Netz geleitet. Jenes erledigt die eigentliche Aufgabe des Netzwerks: Es sagt voraus, welches Wort am wahrscheinlichsten auf die Eingabe folgt. Diese Fähigkeiten hat es durch das Training mit den Beispieldaten gelernt. Um gut zu funktionieren, ist der vorherige Aufmerksamkeitsprozess entscheidend: Nur so kann das Netz das passendste nächste Wort bestimmen.

Jenen Decoder-Prozess durchläuft eine Eingabe mehrmals, wobei die einzelnen Netzwerke jeweils andere Gewichte haben, um verschiedene linguistische Merkmale zu untersuchen. Das Sprachmodell GPT-3 besteht zum Beispiel aus 96 Decoder-Schichten.

Am Ende liefert der Transformer eine Wahrscheinlichkeitsverteilung: Für jedes Wort aus seinem Sprachschatz (der üblicherweise mehrere zehntausend Einträge enthält) berechnet er eine Zahl, die angibt, wie wahrscheinlich es auf die Eingabe folgt. Aus den besten Optionen wählt er

dann eine aus: Für »Spektrum der Wissenschaft ist eine« hat ChatGPT »deutsche« genommen. Das Programm fügt anschließend das ausgegebene Wort zur ursprünglichen Eingabe hinzu und verarbeitet den gesamten Ausdruck nochmal (»Spektrum der Wissenschaft ist eine deutsche«). Daraus leitet es das nächste Wort ab, »monatlich«. So macht es weiter, bis es zum Schluss kommt.

Das erste Transformer-Sprachmodell hat OpenAI im Juni 2018 vorgestellt: GPT-1. Das Überraschende: Es war auch das erste gut funktionierende Sprachsystem, das nicht auf überwachtem Lernen basierte. GPT-1 hat ohne menschliche Anleitung gelernt, natürliche Sprache zu verarbeiten und überzeugende Texte zu liefern. Man hatte dem Algorithmus extrem viele unbeschriftete Trainingsdaten übergeben – es gab keine Beispieleingabe mit der dazu passenden Antwort. Dafür musste das Programm 4,5 Gigabyte unveröffentlichter Bücher durchforsten und auf der Grundlage die Parameter des Modells (etwa die Einträge der Matrizen zur Erzeugung der Vektoren) anpassen. Bücher eignen sich gut zum Training von Sprachmodellen, weil die Netzwerke dadurch lernen, Zusammenhänge über lange Textpassagen hinweg zu beachten.

Nur wenige Monate später, im Februar 2019, erschien schon das Nachfolgemodell GPT-2. Der grobe Aufbau des Transformers hatte sich nicht geändert, aber sowohl die Parameter als auch die Trainingsdaten hat OpenAI verzehnfacht: Die Entwicklerinnen und Entwickler trainierten das Netzwerk mit 40 Gigabyte an Text. Dieses Mal erstellte die Firma dafür einen eigenen Datensatz: Sie durchsuchte das Forum »Reddit« nach beliebten (mit mindestens drei Upvotes gewerteten) Antworten, die Links zu Webseiten enthalten und übernahmen deren Inhalte – damit hofften sie, qualitativ möglichst hochwertige Informationen zu sammeln.

Durch die vielen Daten funktioniert das Modell deutlich besser als sein Vorgänger. Es war sogar so gut, dass OpenAI den Zugang zum Sprachmodell zunächst einschränkte: Die Firma veröffentlichte nicht den vollen Quelltext; zudem hatten anfangs nur ausgewählte Personen Nutzungsrechte. Nach eigenen Angaben befürchtete das Unternehmen, die Technologie könnte zum Erstellen von Spam-Nachrichten oder Fake News genutzt werden. Das führte zu vielen Schlagzeilen, was OpenAI vielleicht auch beabsichtigt hatte.

Obwohl der Quelltext nicht öffentlich einsehbar war, dauerte es nicht lange, ähnliche Sprachmodelle zu bauen. Schließlich hatte die Firma in mehreren Fachveröffentlichungen bereits erklärt, welche Methoden sie genutzt hatte. So konnten zwei frischgebackene Universitätsabsolventen im August 2019 OpenGPT-2 veröffentlichen. Ganz günstig war die Umsetzung aber nicht, die Rechenleistung für das Training kostete etwa 50 000 US-Dollar. Angesichts dieser Fortschritte und der ausbleibenden Flut an Spam oder Fake News veröffentlichte OpenAI drei Monate später dann doch das volle GPT-2-Modell.

Im Juni 2020 erschien die Nachfolgeversion GPT-3, die 175 Milliarden Parameter enthält und mit etwa 570 Gigabyte an Text trainiert wurde. Das Sprachmodell erzeugt

noch überzeugendere Inhalte als die Vorgängerversionen: Es kann Fragen beantworten, Dokumente zusammenfassen, Geschichten in unterschiedlichen Stilen erfinden, Algorithmen in verschiedenen Programmiersprachen erzeugen und Texte übersetzen. Besonders überraschend war, dass der enorme Fortschritt allein durch den Zuwachs an Trainingsdaten und Parametern entstand – die technischen Grundlagen waren dieselben wie jene von GPT-1 und GPT-2. Diese Version wurde jedoch erstmals nicht quelloffen veröffentlicht, ebenso wenig wie der Datensatz, mit dem es trainiert wurde.



METAMORWORKS / GETTY IMAGES / ISTOCK

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

[spektrum.de/t/kuenstliche-intelligenz](https://spektrum.de/t/kuenstliche-intelligenz)

Im März 2023 kam mit GPT-4 die nächste große Überraschung: Dem Modell kann man nicht nur Text, sondern auch Bilder übermitteln. Es kann Abbildungen analysieren und schneidet bei einigen akademischen Tests wohl besser ab als Menschen. Zum Aufbau des Modells hat OpenAI bisher allerdings noch nichts veröffentlicht.

Vermutlich hat OpenAI wie zuvor die Parameter des Sprachmodells und die Trainingsdaten vergrößert. Und eine weitere Methode angewendet, die bereits ChatGPT von GPT-3 unterscheidet: menschliches Feedback. Damit kann OpenAI die KI dazu bringen, besser auf Anfragen von Nutzerinnen und Nutzern einzugehen.

Dafür waren drei Schritte nötig. Zunächst ließ OpenAI Beispielanfragen und Antworten von Menschen niederschreiben. Damit wurde die KI zusätzlich zu den gewöhnlichen Trainingsdaten gefüttert. Allerdings genügen die wenigen Beispiele, die Personen erzeugen können, nicht aus, um ein riesiges Modell wie GPT mit Milliarden von Parametern zu trainieren. Daher haben die Fachleute in einem zweiten Schritt mehrere Ausgaben zu einer einzigen Eingabe generieren lassen, wobei Menschen bewerteten, welche besser passt. Mit diesen Informationen konnten sie ein »Belohnungsmodell« trainieren: Eine KI, die lernt, wie gut einem Menschen eine Ausgabe von GPT gefällt. Damit ließ sich in einem dritten Schritt das Sprachmodell mit dem Belohnungsmodell weiterentwickeln: GPT erzeugt eine Ausgabe, und das Belohnungsmodell bewertet das Ergebnis. Daraufhin passt GPT seine Parameter an, um künftig besser abzuschneiden.

Die letzten beiden Schritte wurden mehrmals wiederholt: Sobald sich GPT durch das Belohnungsmodell aktualisiert hatte, setzte man es wieder Probanden vor, die die neuen Ausgaben bewerteten, womit sie das

Belohnungsmodell weiter verfeinerten. Damit konnten die Entwicklerinnen und Entwickler den Transformer trainieren und die verbesserte Version erneut menschlichen Testern vorsetzen. »Das Reinforcement Learning hat das Sprachmodell so gut gemacht. Durch die Feinjustierung der Parameter kann es passende Antworten liefern und es halluziniert weniger als andere Modelle«, erklärt der KI-Experte Joachim Köhler vom Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS. »Keiner hatte damit gerechnet, dass das so gut klappt«.

Wie sich herausstellte, schnitt ein kleineres Modell (eine Verfeinerung von GPT-3) mit bloß 1,3 Milliarden Parametern besser ab als das volle 175-Milliarden-System. Ergebnis dieser Bemühungen war schließlich der Chat-Assistent »ChatGPT«, der Ende 2022 veröffentlicht wurde und seither für Furore sorgt. Das Programm ist frei nutzbar und kann verschiedenste Arten von Aufgaben überzeugend meistern: Es findet Fehler in Algorithmen, kann eine Abhandlung über allerlei Themen verfassen, oder man kann sich auch einfach damit unterhalten.

Das Programm wurde darauf optimiert, möglichst gefällige Antworten zu liefern. Deshalb steht und fällt die Qualität der Ausgaben mit dem Datensatz und dem Feedback der Menschen, die es trainiert haben. Die Datensammlung umfasst enorme Mengen an Texten, die bis Ende 2021 im Web verfügbar waren. Alles, was danach veröffentlicht wurde, kennt das Programm nicht. Das schließt neue Forschungsergebnisse, Bücher oder politische Ereignisse ein – zum Beispiel weiß die KI nicht, dass Russland 2022 die Ukraine angegriffen hat. Eine weitere Einschränkung ist die menschliche Fehlbarkeit: Wenn das Modell auf eine Frage »Das weiß ich nicht« antwortet, wird das höchstwahrscheinlich schlecht bewertet. Deshalb erfindet das GPT stattdessen eine überzeugende Antwort – die möglicherweise falsch ist, aber wider besseres Wissen gut eingestuft wird.

Als Nutzer kann man die Ausgaben von ChatGPT ebenfalls bewerten. Anhand dieses Feedbacks verbessert OpenAI die Software. So macht das Programm durch eine Aktualisierung im Februar 2023 inzwischen weniger Rechenfehler, was folgendes Beispiel verdeutlicht: Früher lieferte ChatGPT bei der Aufgabe: »Ein Schläger und ein Ball kosten insgesamt 1,10 Euro. Der Schläger kostet 1 Euro mehr als der Ball. Wie hoch ist der Preis des Balls?« die falsche Antwort »10 Cent« – was übrigens auch das am häufigsten von Menschen vorgebrachte Ergebnis ist. Inzwischen ist die KI durch menschliches Feedback allerdings cleverer geworden und sagt:

Angenommen, der Preis des Balls beträgt  $x$  Euro. Gemäß der Aufgabenstellung kostet der Schläger 1 Euro mehr als der Ball. Die Kosten für den Schläger wären also  $(x + 1)$  Euro. Jetzt wissen wir, dass die Gesamtkosten für den Schläger und den Ball 1,10 Euro betragen. Wir können also die folgende Gleichung aufstellen:  $x + (x + 1) = 1,10$ . Vereinfacht man die obige Gleichung, erhält man:  $2x + 1 = 1,10$ . Subtrahiert man 1 von beiden Seiten, erhält

man:  $2x = 0,10$ . Dividiert man beide Seiten durch 2, erhält man:  $x = 0,05$ . Der Ball kostet also 0,05 Euro.

Angesichts dieser beeindruckenden Ergebnisse gibt es einige andere Organisationen und Techfirmen, die mit Sprachmodellen nachziehen möchten. So ließen Reaktionen von Google und Meta nicht lange auf sich warten, aber auch Deutschland will mit Open-GPT-X eine Antwort auf GPT-3 liefern. »Es ist wichtig, dass wir in Europa eine solche Technologie entwickeln, die an unseren Werten und Bedürfnissen orientiert ist und datenschutzkonform ist«, sagt Burchardt. Köhler stimmt zu: »Wir verlieren unsere Souveränität, wenn wir all unsere Daten, insbesondere Betriebsinterna, einem amerikanischen Unternehmen übergeben.«

Die größten Herausforderungen für solche Projekte stellen die riesigen Datensätze dar sowie die Rechenkapazitäten. OpenGPT-X wird aktuell im Forschungszentrum Jülich trainiert. »Wenn es aber irgendwann um eine kommerzielle Nutzung geht, können wir nicht auf Forschungsrechenzentren zurückgreifen«, erklärt Köhler. Bislang fehlt es in Europa jedoch an kommerziellen Rechenzentren. Eines baut die Firma Aleph Alpha in Heidelberg auf. Aber auch das nachträgliche menschliche Reinforcement Learning der Modelle gestaltet sich für eine europäische Initiative komplizierter als für Firmen in

Übersee wie OpenAI: »Wir müssen uns dabei an europäische Richtlinien wie den Datenschutz halten und die Personen für ihre Arbeit angemessen vergüten«, sagt Köhler.

Angesichts der Begeisterung und Kritik, die die neuen Sprachmodelle hervorrufen, gerät oft ein entscheidender und bisher unersetzlicher Faktor in den Hintergrund: der Mensch. Es sind die Bemühungen der Entwicklerinnen und Entwickler, denen wir diese Technologie verdanken – ebenso wie der Arbeit jener Personen, die die relevanten Datensätze erstellen und filtern sowie am Reinforcement Learning beteiligt sind. Bei Letzteren handelt es sich meist um Arbeitnehmer aus dem Niedriglohnsektor, die etwa gewaltverherrlichende, pornografische oder strafbare Inhalte aus den Trainingsdaten entfernen. Künftig könnte zumindest diese undankbare Aufgabe hoffentlich eine Maschine übernehmen. ◀

## QUELLEN

**Brown, T.B. et al.:** Language models are few-shot learners. ArXiv: 2005.14165, 2020

**Liu, P.J. et al.:** Generating Wikipedia by summarizing long sequences. ArXiv: 1801.10198, 2018

**Vaswani, A. et al.:** Attention is all you need. ArXiv: 1706.03762, 2017

UNSPASH / VINICIUS „AMM“ AMANO (https://unsplash.com/de/fotos/PVtMcUaNoCj)

## Spektrum LIVE

ONLINE WHISKY-TASTING UND VORTRAG

# DIE WISSENSCHAFT VOM WHISKY

Whisky ist ein komplexes Getränk – er überspannt das gesamte Spektrum von fruchtigen Noten bis zu herben Raucharomen. Doch welche Stoffe erzeugen Geruch und Geschmack der verschiedenen Whiskys, und wie kommen sie ins Glas? Der Chemiker und Journalist Lars Fischer erklärt die molekularen Hintergründe des schottischen Nationalgetränks und beantwortet nebenbei auch die alte Streitfrage: mit Wasser – ja oder nein?

Infos und Anmeldung:

**Spektrum.de/live**

Freitag  
28. April  
2023



# Befreiende Luftströme im Sand

Es ist leichter, ein Trinkglas kopfüber in lockeren Sand zu drücken, als ein beidseitig offenes Rohr gleicher Abmessungen. Die aus dem Glas nach unten herausgepresste Luft zerstört Kraftbrücken zwischen den Körnern, die sich normalerweise durch Reibung bemerkbar machen.

» [spektrum.de/artikel/2120772](http://spektrum.de/artikel/2120772)

»Das Sandkorn ist gewiß das nicht, wofür ich es ansehe«

Georg Christoph Lichtenberg

Zur Aufbewahrung von Tee benutze ich eine alte ostfriesische Teedose. Im oberen Bereich verjüngt sie sich, damit die Blätter problemlos in den Messbecher geschüttet werden können, der zugleich als Deckel dient. Beim Nachfüllen muss ich einen Trichter benutzen, und das funktioniert nicht immer ohne Probleme. Oft stockt der Fluss der Blätter. Die intuitive Idee, ihn durch Druck zu verstärken, bringt hier nichts. Ich erreiche dadurch eher, dass sich alles bloß noch mehr verdichtet und ich die Prozedur von vorn beginnen muss.

Dieses Verhalten betrifft nicht nur Teeblätter, sondern alle Granulate wie Sand, Salz, Müsli oder Erbsen. Die Ursache sind so genannte Kraftbrücken. Den größten Teil des ausgeübten Drucks nehmen granulare Netzwerke auf, quer durch das Material verlaufende Verdichtungen. An ihnen wird die Kraft von einer Wand zur anderen abgeleitet. Das baut so etwas wie eine Barriere für nachfließende Materie auf. Dann rutschen die Teilchen nicht mehr in dem Maß nach, wie sie unten herausrieseln, sondern stützen sich gegenseitig und an den Wänden ab.

Seit Menschengedenken dient dieser Effekt der Konstruktion von freitragenden Brücken und Bögen in Gebäuden. Solche Gewölbe



H. JOACHIM SCHLICHTING

werden allerdings gezielt hergestellt, während sie in Granulaten durch Zufall an nicht vorherbestimmbaren Stellen entstehen und sich weitgehend der Kontrolle entziehen.

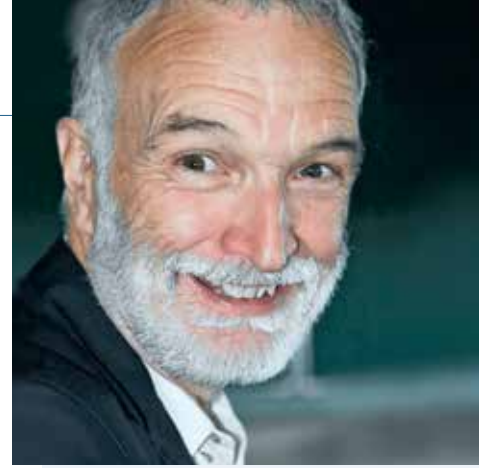
Beim Tee ist die sanfte Tour erfolgversprechender als Druck. Leichtes Klopfen oder Schütteln senkrecht zur Fließrichtung an der entsprechenden Stelle am Trichter löst die Blockade in den meisten Fällen auf.

In der Physik der granularen Materie werden solche Phänomene Jamming genannt. Eine eindrucksvolle Demonstration bietet ein Stab, den man mit großer Kraft in ein schmales Röhrchen presst, das mit Sand oder einem anderen Granulat gefüllt ist. Er sitzt schließlich so fest, dass man mit ihm das Behältnis samt Inhalt hochheben kann, sofern deren Gewicht nicht zu groß ist. Leichtes Schütteln setzt die Schwerkraft wieder in ihre alten Rechte – das Gefäß fällt.

Ebenso macht das Geschicklichkeitsspiel Scheibensmikado von dem erstaunlichen kollektiven Verhalten Gebrauch. Hier muss man aus einer Fläche mit Scheibchen, die von einer starken Feder zusammengedrückt werden, einzelne entfernen, ohne dass sich die Nachbarn bewegen.

Noch bevor die Kraftbrücken im Rahmen der Physik der granularen Materie näher erforscht wurden, habe ich sie unwissentlich beim Spiel mit meinem Sohn im Sandkasten kennen gelernt. Der Versuch, ein Installationsrohr in den trockenen Sand zu drücken, gelang mir nur mit äußerster Anstrengung. Klopfen und Rüt-

**FIXIERTES GEFÄSS** Ein offenes und mit Sand gefülltes Behältnis lässt sich an einem Stab hochheben, wenn dieser fest genug hineingedrückt wurde.



H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für »Spektrum« über physikalische Alltagsphänomene.



**SCHEIBENMIKADO** In dem Geschicklichkeitsspiel stehen die Scheiben im unteren Teil unter Federdruck. Die dadurch entstehenden Kraftbrücken schirmen stets einige Steine ab. Diese gilt es zu entnehmen, ohne dass sich der Schieber bewegt.

teln halfen wenig. Zu meinem Erstaunen beobachtete ich bei anderer Gelegenheit, wie mein Sohn ein Trinkglas von vergleichbarem Durchmesser ohne große Mühe auf dieselbe Weise im Sand versenkte. Lag das vielleicht daran, dass Glas auf Grund seiner Materialeigenschaften leichter durch den Untergrund gleitet als ein PVC-Rohr? Doch als ich Letzteres durch einen passenden Deckel fest verschloss, ließ es sich einfacher hineinschieben.

**PARADOXE SITUATION** Ein Becher ohne Boden lässt sich nur schwer in den Sand drücken. Gegen alle Intuition fällt es wesentlich leichter, das geschlossene Gefäß zu versenken. Dabei beobachtet man Luft, die an den Seiten herausgeblasen wird und kleine Hügelchen erzeugt.



Das widerspricht der Intuition, weil dann Luft eingesperrt ist und bei der Aktion komprimiert wird. Man könnte leicht vermuten, dadurch käme es zu einer zusätzlichen Gegenkraft, so wie es der Fall ist, wenn man ein umgestülptes Glas in ein Wasserbecken drückt. Stattdessen erleichtert die Luft das Ganze irgendwie.

Die Sache geriet in Vergessenheit, bis ich vor einiger Zeit auf eine Fachpublikation stieß. In dieser berichtete eine Gruppe von Physikern der Universität Paris VII über Messungen, die man als quantitative Fortführung unserer Spielereien im Sandkasten betrachten kann.

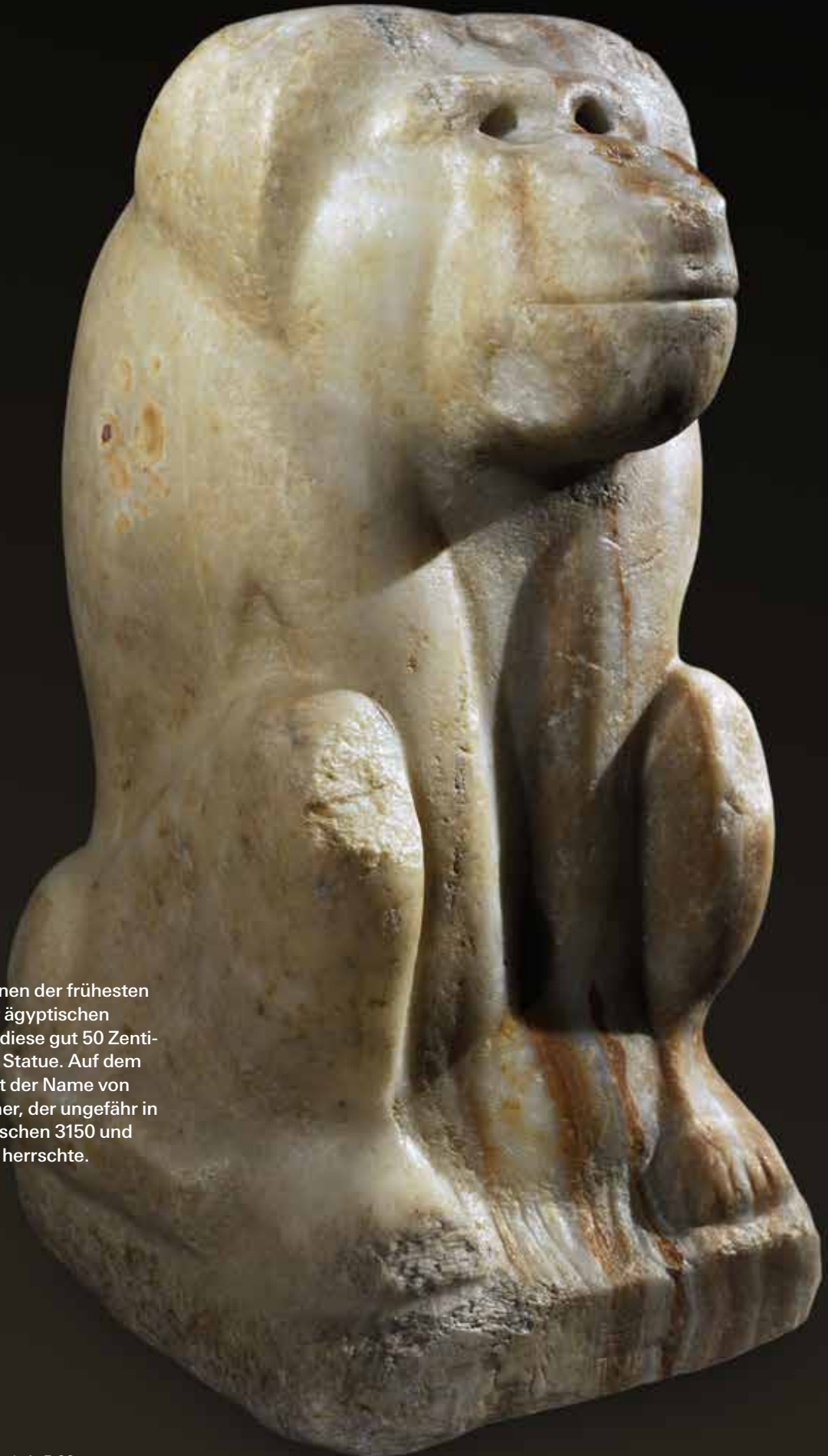
Das Team hat derartige Sandexperimente in reproduzierbarer Weise präpariert und sie sowohl in lockeren als auch in verfestigten Schichten durchgeführt. Auf ihren Zylinder übertrugen die Wissenschaftler eine Kraft, indem sie ihn mit einem Behälter belasteten. Dessen Gewichtskraft vergrößerten sie systematisch. Als Maß für die Leichtigkeit des Eindringens des Zylinders ermittelten sie die jeweils erreichte Tiefe.

Die Forscher bestätigten unsere erstaunliche Beobachtung, dass ein geschlossenes Rohr wesentlich einfacher versenkt werden kann als ein offenes. Der Versuch lässt sich mit zwei Plastikbechern nachstellen, wenn man bei einem der beiden den Boden entfernt. Presst man den intakten Becher in den Sand, gerät das abnehmende Luftvolumen unter erhöhten Druck. Dieser wird schließlich so groß, dass die Luft an der inneren Seite unter den versenkten Rand strömt und an der Außenseite ins Freie gelangt. Das wirbelt den Sand im Grenzbereich auf und verflüssigt ihn regelrecht, indem es fixierende Kraftbrücken unterbricht und verhindert, dass sich neue bilden.

Der Luftstrom beim Druck auf den Behälter erfüllt in etwa die Funktion meines leichten Klopfens beim Lösen stockender Teeblätter. Der luftgefüllte Raum zwischen den eigentlichen Teilchen eines Granulats ist also nicht bloß eine nebensächliche Gegebenheit. Vielmehr kann die scheinbare Leere eine aktive Rolle bei der Bewegung und den Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bestandteilen spielen.

#### QUELLE

Clément, R. et al.: Penetration and blown air effect in granular media. *Physical Review Letters* 106, 2011



**PAVIAN** Einen der frühesten Affen in der ägyptischen Kunst zeigt diese gut 50 Zentimeter hohe Statue. Auf dem Sockel steht der Name von König Narmer, der ungefähr in der Zeit zwischen 3150 und 3100 v. Chr. herrschte.

ALAMY / PRISMA ARCHIVO



# Das Rätsel der heiligen Paviane

In Afrika gelten Paviane oft als Plage, doch für die alten Ägypter waren sie heilige Tiere. Zu dieser Vorstellung bewog die Menschen womöglich das Verhalten der Affen, die sie aus dem sagenumwobenen Punt heranschafften. Pavianmumien geben nun Aufschluss über die tatsächliche Lage jenes »Goldlands«.

» [spektrum.de/artikel/2120775](https://www.spektrum.de/artikel/2120775)



**Nathaniel J. Dominy** ist Primatologe und Evolutionsbiologe am Dartmouth College in New Hampshire in den USA. Er forscht schwerpunktmäßig über das Verhalten, die Ökologie und die funktionelle Morphologie von Primaten.

▶ Seine letzte Ruhe fand EA6736 im British Museum in London. Die Inventarnummer gehört zu einer Mumie aus dem Tempel des Chons im ägyptischen Karnak. Der einbalsamierte Körper stammt aus der Zeit des Neuen Reichs, das Ägyptologen von zirka 1550 bis 1069 v. Chr. ansetzen. Wer oder was EA6736 zu Lebzeiten war, zeigt sich bei genauem Hinsehen: Die sorgfältig gewickelten Leinenbinden sind stellenweise zerfallen – und aus den Löchern ragen Fellhaare; an den Füßen stehen kräftige Zehennägel hervor. Röntgenaufnahmen offenbaren das charakteristische Skelett und den schnauzenförmigen Schädel eines Primaten. Bei der mumifizierten Kreatur handelt es sich um *Papio hamadryas*, einen Mantelpavian, den die alten Ägypter als heiliges Tier verehrten.

## AUF EINEN BLICK

### Vergöttlichte Sonnenanbeter

- 1** Paviane sind in Ägypten nicht heimisch, dennoch wurden sie im Altertum dort als heilige Tiere verehrt.
- 2** Ihr Verhalten könnte ein Grund dafür sein: Die Affen sonnen sich morgens, vermutlich um ihre Verdauung anzuregen. Die Ägypter deuteten dies vielleicht als Anbetung der Sonne.
- 3** Isotopenanalysen an mumifizierten Pavianen ergaben als deren Herkunftsort die südliche Region des Roten Meers am Horn von Afrika. Womöglich lag dort das rätselhafte Königreich Punt, aus dem man die Tiere holte.

EA6736 ist ein Beispiel von vielen für die bedeutende Rolle von Pavianen in der Kunst und Religion des alten Ägypten. Auf zahlreichen Wandmalereien und Reliefs, ebenso als Statuen und Schmuckstücke tauchen die Primaten in der gut 3000-jährigen Geschichte der Nilzivilisation immer wieder auf. Eines der ältesten Zeugnisse ist die Statue eines Mantelpavians, in deren Sockel der Name von König Narmer eingeritzt steht. Dieser war einer der frühesten Pharaonen Ägyptens, wenn nicht sogar der erste, als er zwischen 3150 und 3100 v. Chr. regierte. Fast zwei Jahrtausende später herrschte Tutanchamun über das Land am Nil, von 1332 bis 1323 v. Chr. Zu seinem Grabschatz gehört ein mit Pavianen verziertes Pektoral, ein Brustschmuck: Die Affen sitzen auf einer Barke und huldigen mit erhobenen Armen dem Skarabäus in ihrer Mitte, der eine Form des Sonnengotts Re darstellt. Und in Tutanchamuns Gruft im Tal der Könige zieren gleich zwölf solche Primaten eine Wand der Grabkammer. Die Tiere symbolisieren wohl die Stunden der Nacht.

Die alten Ägypter verehrten den Mantelpavian als Verkörperung von Thot, dem Gott des Mondes, der Weisheit, des Wissens und des Kalenders, zugleich fungierte jener als Berater des Sonnengotts Re. Der Pavian ist aber längst nicht das einzige Tier, das die Menschen damals heilig nannten: Der Schakal stand mit dem Totengott Anubis in Verbindung, der Falke mit der Himmelsgottheit Horus und das Flusspferd mit Taweret, der Schutzgöttin für Geburt und Fruchtbarkeit. Dennoch ist der Pavian ein eigenartiges heiliges Tier. Für die meisten Menschen, die regelmäßig mit diesen Primaten zu tun haben, sind sie nämlich nichts anderes als gefährliche Plagegeister. Zudem ist der Pavian das einzige Tier der ägyptischen Götterwelt, das nicht im Niltal heimisch ist.

### Paviane aus dem sagenhaften Königreich Punt

Archäologen rätseln daher seit Langem, warum der Mantelpavian eine derart wichtige Rolle in der altägyptischen Kultur spielte. Nun haben meine Kollegen und ich in den vergangenen Jahren einiges herausgefunden, das zur Lösung des Rätsels beiträgt. Warum die Spezies in den Augen der Ägypter als göttlich galt, können wir mit Hilfe der Verhaltensbiologie erklären. Ebenso konnten wir feststellen, woher die exotischen Tiere stammten. Dabei liefern unsere Erkenntnisse auch Hinweise, um ein weiteres Geheimnis zu lüften: wo einst das sagenumwobene Königreich Punt gelegen haben könnte.

»Paviane!« Dieser Ausruf würde wohl auf jedem Kindergeburtstag für helle Aufregung sorgen. Ich lebte mit meiner Familie in Kenia, als ein Trupp von 20 Pavianen unseren Hinterhof enterte. Während die Kinder kreischten, stürzten sich die Eindringlinge auf den Festtisch, der mit Muffins, aufgeschnittenem Obst und Safttüten gedeckt war. Innerhalb weniger Minuten verputzten die Affen das Büffet, das wir stundenlang vorbereitet hatten. Doch das Schlimmste war nicht allein, meinen Sohn weinen zu sehen, sondern auch auf die beiden Pavianmännchen blicken zu müssen, die in meine Richtung

gähnten. Als Primatologe weiß ich: Sie gähnen, um ein soziales Signal zu senden. Auf diese Weise fletschen sie ihre messerscharfen Fangzähne. Mit einem einzigen Biss können die Tiere damit die Gliedmaße eines Menschen bis auf die Knochen zerfleischen. Aber vielleicht wollten die Affen auf dem Geburtstag meines Sohnes auch nicht zur Einschüchterung gähnen, sondern sich selbstgefällig und satt gebärden.

Als ich die Geschichte meinen kenianischen Kollegen erzählte, ertete ich wissendes Nicken und bekam ein Sprichwort zu hören: »Nicht alle Paviane, die über ein Maisfeld herfallen, kommen zufrieden wieder heraus.« Wie viele afrikanische Sprichwörter hat dieses eine mehrschichtige Bedeutung. Es spielt darauf an, dass Paviane fressgierige Kreaturen sind und sich in ihrer Unersättlichkeit über Felder hermachen; aber zugleich vermutet man hinter ihrem Verhalten finstere Absicht. Catherine M. Hill, Anthropologin an der Oxford Brookes University in England, fand heraus, dass Paviane im Westen Ugandas die Ernteerträge mancher Familien um die Hälfte reduzieren. Nicht nur dort – für viele Subsistenzbauern in Afrika sind Paviane eine verheerende Plage und der schlimmste Schädling überhaupt. Entsprechend stark ist die Aversion gegen die Tiere ausgeprägt. Es verwundert daher nicht, dass sie in der Kunst und im Handwerk der Länder südlich der Sahara kaum vorkommen. Und umso mehr überrascht es, dass die alten Ägypter die Affen zu Göttern machten und sie so häufig in ihren Bildwerken zeigten. Was steckt dahinter?

Heute unterscheiden wir sechs Arten von Pavianen. Alle sind in Afrika südlich der Sahara und im Südwesten der Arabischen Halbinsel beheimatet – und die allermeisten Menschen in diesen Gebieten halten die Tiere für Schädlinge. Archäologen wissen auf Grund diverser Funde, dass die alten Ägypter sowohl *Papio anubis* – den Anubispavian oder Grünen Pavian – als auch *Papio hamadryas*, den Mantelpavian, aus Regionen außerhalb ihres Landes einführten. Gleichwohl erhoben sie lediglich die Mantelpaviane zu Göttern. Will man also wissen, warum die Affen im Altertum verehrt wurden, muss man zugleich erklären, weshalb nur die eine, aber nicht die andere Art derart geschätzt wurde.

Um der Bedeutung des Mantelpavians auf die Spur zu kommen, haben Fachleute untersucht, wie ägyptische Künstler das Tier abbildeten. Dabei stießen sie auf zwei typische Darstellungsweisen: In der einen sitzt ein männlicher Pavian auf der verdickten Haut seines Hinterns, die Hände ruhen auf den Knien, der Schwanz ist nach rechts aufgerollt und auf dem Kopf thront eine Mondscheibe. Das andere Motiv entspricht dem so genannten Anbetungsgestus. Das Männchen hebt seine Arme mit nach außen gedrehten Handflächen und preist auf diese Weise den Sonnengott Re.

In zahlreichen ägyptischen Schriftquellen werden Paviane mit Re in Verbindung gebracht. Die Pyramidentexte des Alten Reichs, also die Inschriften im Inneren von Königsgräbern der 5. und 6. Dynastie (um 2400 bis 2200 v. Chr.), nennen den Pavian als den ältesten und



**POSE FÜR DIE EWIGKEIT** Die Pavianmumie EA6736 im British Museum kam ursprünglich aus dem Tempel des Chons in Karnak bei Luxor. Die Ägypter hatten den Affen aus dem Gebiet am Horn von Afrika geholt.



**BETENDE PRIMATEN** Zwei Mantelpaviane verehren mit erhobenen Pfoten den Sonnengott in dessen Form als Skarabäus. Die drei fahren in einer Sonnenbarke auf Wasser, darüber spannt sich das Himmelszelt mit Sternen. Der Brustschmuck stammt aus dem Grab des Tutanchamun.

meistgeliebten Sohn des Re. Und im ägyptischen Totenbuch ruft der Verstorbene beim Besteigen der Sonnenbarke: »Ich habe gesungen und die Sonnenscheibe angebetet, ich habe mich den Sonnenaffen [Pavianen] zugesellt und bin einer von ihnen.«

Weshalb brachten die alten Ägypter die Affen überhaupt mit Re in Verbindung? Die Ägyptologin Elizabeth Thomas (1907–1986) legte dazu 1979 folgende Erklärung vor: Die Menschen könnten beobachtet haben, wie sich Paviane morgens der aufgehenden Sonne zuwandten, um sich zu wärmen. Womöglich deuteten sie dieses Verhalten so, als würden die Affen die Sonne willkommen heißen. Ein Jahrzehnt später erhielt die These großen Zuspruch durch den Ägyptologen Herman te Velde (1932–2019). Er nahm an, dass die Laute, die die Paviane morgens beim Sonnenbad von sich geben, als Grußworte an die Sonne verstanden wurden. Texte an den Tempelwänden von Karnak bei Luxor beschreiben Paviane, wie sie den Gott Re »verkünden«, indem sie als Jubelaffen für ihn tanzen, jauchzend für ihn springen und ihn preisen. Nach Ansicht von te Velde hielten die Ägypter die Paviane wohl deshalb für heilige Tiere, weil sie den Gott scheinbar direkt ansprechen konnten. Sie hätten das Gekreische als Jubel und die unverständlichen Laute als Beleg für religiöses Wissen interpretiert, vermutete te Velde.

Die Erklärungen von Thomas und te Velde klingen überzeugend, aber sind sie auch plausibel? Wenden sich Paviane tatsächlich der Morgensonne auffällig zu? Und ist das ein typisches Verhalten der Mantelpaviane? Weder Thomas noch te Velde kannten sich mit der Verhaltensbiologie von Primaten aus – und bislang hat kein Primatologe je ihre Theorien überprüft. Meine Kollegen und ich konnten nun zu diesen Fragen in den vergangenen Jahren aufschlussreiche Erkenntnisse gewinnen.

In der Tat sonnen sich viele Tiere. Dadurch verringern sie den Energieaufwand, nach einer kalten Nacht ihren Körper wieder aufzuwärmen – so lautet der Erklärungsansatz der meisten Biologen. Die Kattas auf Madagaskar, eine Lemurenart mit charakteristischem Ringelschwanz, blicken beispielsweise regelmäßig in die Morgensonne und nehmen dabei eine Haltung ein, die der Lotusstellung beim Yoga ähnelt; allerdings winkeln sie ihre Beine an oder strecken sie aus. Laut einer madagassischen Legende verehren die Lemuren die Sonne, indem sie ihre Arme zum Gebet ausstreckten, wie die US-Primatenforscherin Alison Jolly (1937–2014) berichtete.

2016 erkannte Elizabeth Kelley, Leiterin des WildCare Institute am Saint Louis Zoo in Missouri, dass das Sonnenbaden der Lemuren stark mit niedrigen Nachttemperaturen korreliert. Wie Kelley und ihre Kollegen zudem herausfanden, enthält die Haut im Brust- und Bauchbereich der Lemuren mehr Melanin als die Haut auf dem Rücken. Die Körperfarbe ist damit bei den Lemuren anders verteilt als bei den meisten Säugetieren. Melanin ist ein Hautpigment, das Licht absorbiert – und wenn es vor allem in der Bauchgegend ausgeprägt ist, dann hilft es nicht nur beim Aufwärmen, sondern auch bei der Verdauung.

Primatenstudien aus den vergangenen Jahren haben in der Tat gezeigt, dass Paviane die Sonnenwärme zur Verdauung nutzen. Um pflanzliche Nahrung zu verwerten, sind sie auf ihre Darmmikroben angewiesen. Steigt ihre Körpertemperatur, arbeiten diese Bakterien effektiver, was wiederum die Nährstoffaufnahme im Darm erhöht. Das Sonnenbaden ist also eine einfache und wirksame Methode, um die Mikroben morgens in Schwung zu bringen. Damit profitieren die Paviane doppelt: Die Verdauung selbst erzeugt nämlich ebenfalls Wärme, was dabei hilft, den durch die Nachtluft abgekühlten Körper aufzuwärmen. Und falls die Kälte die Darmaktivität nachts verlangsamt hat, dann können die Primaten die gestrige Mahlzeit rasch noch verwerten, bevor sie sich auf die Suche nach neuer Nahrung machen.

Es wäre also denkbar, dass einige Primatenarten ausgiebiger sonnenbaden als andere – abhängig davon, wo sie leben und was sie fressen. Mantelpaviane streifen in trockenen Habitaten umher, am Horn von Afrika und in Teilen der Arabischen Halbinsel. Der Westen ihres Verbreitungsgebiets grenzt im Tal des äthiopischen Flusses Awash an den östlichen Verbreitungsbereich von *Papio anubis*. Dieser Umstand hat Forscher schon lange dazu bewogen, die ökologischen und verhaltensbiologischen Unterschiede zwischen den beiden Pavianarten zu untersuchen. Bei Beobachtungen zeigte sich, dass Mantelpaviane mehr Blattgewächse fressen als Anubispaviane; ihre Nahrung hat also einen höheren Ballaststoffgehalt.

### Die Morgenroutine der Mantelpaviane

Auf Grund ihrer unterschiedlichen Ernährungsweise müssten sich die Mikroorganismen beider Pavianspezies in Menge und Art unterscheiden. Der biologische Anthropologe Steven Leigh von der University of Colorado Boulder und seine Projektmitarbeiter, darunter ich, konnten diese Annahme bestätigen, indem wir das Darmmikrobiom beider Spezies analysierten. Offensichtlich verfügen Mantelpaviane über mehr so genannte zellulolytische Mikroben als Anubispaviane – also über Bakterien, die pflanzliche Zellmembranen aufspalten und abbauen können. Das hängt vermutlich mit ihrer ballaststoffreichen Ernährung zusammen. Daher dürften erstere Tiere auch stärker von einem frühmorgendlichen Sonnenbad profitieren. Unsere Ergebnisse bestätigen demnach die These von Thomas, dass die Ägypter wohl Mantelpaviane dabei beobachteten, wie diese »die Sonnenscheibe begrüßen«. Damit lässt sich zudem erklären, warum sie *Papio hamadryas*, aber nicht *Papio anubis* als heiliges Tier verehrten: Nur die Ernährungsweise und Morgenroutine der Mantelpaviane standen offenbar in Einklang mit den religiösen Vorstellungen der Ägypter.

Warum auch immer sie die Tierart vergöttlichten, eines ist klar: Sie unternahmen große Anstrengungen, um an Mantelpaviane heranzukommen. Die Nachfrage nach den Affen sowie nach Luxusgütern wie Gold, Weihrauch und Elfenbein diktierte die damaligen Handelsbestrebungen und beeinflusste den Lauf der Weltgeschichte (siehe »Spektrum der Wissenschaft« 4/2023, ab S. 24).

Im Jahr 1906 entdeckte Theodore M. Davis (1837–1915), US-Anwalt mit der Lizenz zum Graben im Tal der Könige, dort fünf Mumien von *Papio hamadryas*. Die einbalsamierten Tierkörper lagen in drei Gräbern, die sich unweit der Ruhestätten von Amenhotep II. und Haremhab befinden und mit diesen in Verbindung stehen könnten. Beide Könige gehören der 18. Dynastie im Neuen Reich an, einer Zeit großen Wohlstands. Im Grab des Vaters von Amenhotep II., Thutmosis III., fand sich zudem ein Schädel von *Papio hamadryas*, den offenbar Grabräuber aus der Mumie gerissen und dann fortgeworfen hatten.

Obwohl Paviane bereits zuvor in der ägyptischen Kunst abgebildet wurden, stellen die Mumien die ältesten bekannten Überreste von Mantelpavianen in Ägypten dar. Was den Zeitpunkt betrifft, so tauchen diese Exemplare recht unvermittelt auf – noch dazu im Friedhof der Pharaonen. Sie dürften demnach unter großem Aufwand herangeschafft worden sein. Die Ägyptologin Salima Ikram von der American University in Kairo ist der Ansicht, dass die Paviane einerseits geliebtes Haustier, andererseits exotisches Statussymbol waren – solche von hohem Wert: Ihre mumifizierten Körper waren in große Mengen feinstes Leinen gewickelt worden, was sich nur wohlhabende Menschen leisten konnten, und sie waren in der Königsnekropole beigesetzt.

Um herauszufinden, woher die Mantelpaviane stammten, analysierten meine Kollegen und ich zwei Affenmumien – darunter die eingangs erwähnte EA6736. Beide Exemplare hatte Henry Salt erworben, als er von 1816 bis 1827 englischer Generalkonsul in Ägypten war. Später gelangten die Tierkörper in das British Museum. Im Gegensatz zu den Mumien, die Theodore M. Davis im Tal der Könige fand, ist das Alter der Stücke in London nicht gesichert. Auf Grund der Art und Weise, wie die Tierleichen in die Binden gewickelt wurden, und angesichts der Tatsache, dass sie aus Tempeln in Theben stammen, dürften sie aber in die Zeit des Neuen Reichs gehören, also in die Phase vom 16. bis 11. Jahrhundert v. Chr.

### Auf dem Seeweg nach Punt

Wie Schriftquellen aus jener Epoche verraten, nutzten die Ägypter den Hafen von Mersa Gawasis an der Westküste des Roten Meers, um von dort mit Schiffen in das geheimnisvolle Königreich Punt zu fahren – weit entfernt und voller Luxuswaren wie exotischen Pavianen befand es sich angeblich in einem »Gottesland«. Die historische Bedeutung von Punt ist beträchtlich: Der britische Historiker John Keay beschrieb den Seeweg nach Punt als allerersten großen Abschnitt der Gewürzroute. Jenes Handelsnetzwerk trieb jahrtausendlang die Schiffstechnologie voran und bestimmte die Geschicke der Weltpolitik. Doch es gibt ein Problem mit dieser

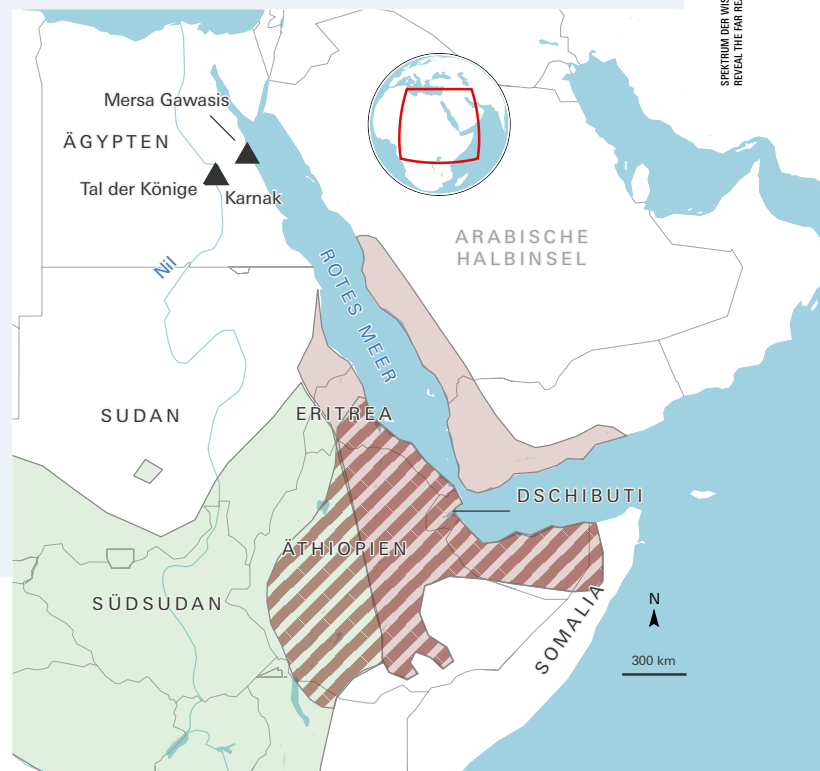
Deutung, wie der Archäologe Jacke Phillips 1997 anmerkte: »Punt wurde bisher auf keiner Karte eindeutig lokalisiert, und bislang wurden keine archäologischen Überreste jemals auch nur ansatzweise als »puntisch« identifiziert.«

Wenn aber die Ägypter Mantelpaviane aus Punt eingeführt hatten, dann verrät vielleicht der ursprüngliche Herkunftsort der Mumien die Lage des legendären Goldlands. Zum Glück können wir inzwischen rekonstruieren, woher die Paviane einst stammten und wo sie lebten, indem wir ihr Gewebe und ihre Knochen chemisch analysieren. Meine Kollegen und ich konzentrierten uns dabei auf das Element Strontium. Dessen Isotope kommen je nach Ort in unterschiedlicher Zusammensetzung im Gestein vor. Boden und Wasser nehmen Strontium auf. Wenn Tiere in einer Region nun Pflanzen fressen, die dort wachsen, und Wasser trinken, gelangt das Strontium in die Nahrungskette – und lagert sich beispielsweise beim Heranwachsen in den Zähnen der Tiere ein. Der darin enthaltene Isotopenwert gibt dann Aufschluss über den Geburtsort eines Lebewesens. Der Strontiumgehalt in Knochen und Haaren wiederum ändert sich im Lauf des

## Wo die Paviane umherstreifen

Mantelpaviane (*Papio hamadryas*) leben am Horn von Afrika und im Südwesten der Arabischen Halbinsel. Ihre Verwandten, die Anubispaviane (*Papio anubis*), sind von der Westküste bis nah an die Ostküste Afrikas verbreitet. Wo die beiden Gebiete aneinanderstoßen, könnte im Altertum Punt gelegen haben.

- ▲ Fundort
- Verbreitungsgebiet von *Papio hamadryas*
- Verbreitungsgebiet von *Papio anubis*
- ▨ mögliche Lage von Punt





EDWIN BUTTERY / GETTY IMAGES / ISTOCK

**ZÄHNE FLETSCHEN** Ein Mantelpavian (*Papio hamadryas*) reißt sein Maul auf. Das Verhalten könnte zur Einschüchterung dienen.

Lebens; er liefert Hinweise darüber, wo sich ein Tier kurz vor seinem Tod aufgehalten hat.

Wir haben die Strontiumisotopenwerte aus den Knochen und Zähnen der Mumien mit solchen von Pavianen verglichen, die heutzutage in Afrika leben. Unser Ergebnis: Die Affen waren außerhalb Ägyptens im südlichen Teil der Region am Roten Meer zur Welt gekommen – ungefähr dort, wo sich heute die Länder Äthiopien, Eritrea, Dschibuti und Somalia befinden. Tatsächlich haben Ägyptologen diese Gebiete anhand von schriftlichen Überlieferungen sowie Abbildungen von Pflanzen und Tieren an den Wänden von Tempeln und Gräbern bereits als mögliche Lage von Punt identifiziert.

Eine 2023 vorab veröffentlichte, noch nicht begutachtete Studie bestätigt unsere Ergebnisse. Die Genetikerin Gisela Kopp von der Universität Konstanz hat mit einer Arbeitsgruppe, an der ich beteiligt war, das mitochondriale Erbgut eines mumifizierten Pavians im Musée des Confluences in Lyon ausgelesen. Wir haben parallel das Mitogenom von 14 Tierproben aus jüngerer Vergangenheit untersucht, um die genetische Abstammungsgeschichte der Paviane und die Verbreitung genetischer Variationen im nordöstlichen Afrika zu rekonstruieren. Dies ergab, dass die zirka 2600 bis 2800 Jahre alte Tiermumie, ein *Papio hamadryas*, sehr wahrscheinlich aus der Region des heutigen Eritrea und Ostsudans stammte. Schriftsteller nachchristlicher Jahrhunderte nennen den Ort Adulis in Eritrea als Umschlagplatz von exotischen Tieren – unter anderem von Pavianen. Womöglich lag in der Antike Adulis dort, wo auch das Königreich Punt lag.

Dass die Ägypter schon zuvor im 2. Jahrtausend v. Chr. Paviane von der Südspitze des Roten Meers ins Land am Nil schafften, bezeugt die erstaunlichen Fähigkeiten und

die große Reichweite ihrer Seefahrer. Mit offenen Booten ohne Kiel segelten sie allem Anschein nach mindestens 1300 Kilometer weit – einfache Wegstrecke. Die Fahrten müssen gefährlich gewesen sein. Und vielleicht ist es kein Zufall, dass eine der berühmtesten Erzählungen der altägyptischen Literatur, »Der Schiffbrüchige«, von einem Seemann handelt, der mit seiner Besatzung in einen Sturm geriet, Schiffbruch erlitt und auf einer magischen Insel im Roten Meer an Land gespült wird. Dort ergreift ihn eine riesige sprechende Schlange, die sich ihm später als Herrscher von Punt offenbart.

Trotz der neuen Erkenntnisse ist längst noch nicht alles über die Religion und die Handelspraktiken der alten Ägypter bekannt. So wäre es zum Beispiel wichtig, mehr über das allmorgendliche Verhalten der Mantelpaviane herauszufinden und die Verteilung des Melanins in ihrem Körper genauer zu untersuchen. Zeigt sich, dass die Art tatsächlich auf die Morgensonne angewiesen ist, würde das die oben beschriebene These stützen. Auch sollte man in Eritrea und seinen Nachbarländern nach archäologischen Zeugnissen suchen, etwa altägyptischen Objekten, um festzustellen, ob Punt einst tatsächlich in dieser Region lag.

Was wohl die Händler von Punt davon hielten, dass die Ägypter so versessen auf ihre Paviane waren? Vielleicht tauschten sie die Plagegeister nur allzu gern gegen Handelswaren aus dem Norden? Ein verlockender, jedoch rein spekulativer Gedanke. Wie dem auch sei: Dieser Besonderheit der ägyptischen Kultur verdanken wir wichtige Erkenntnisse über eine der bedeutendsten Handelsrouten der Menschheitsgeschichte. ◀

## QUELLEN

**Amato, K. et al.:** Convergence of human and Old World monkey gut microbiomes demonstrates the importance of human ecology over phylogeny. *Genome Biology* 20, 2019

**Dominy, N. et al.:** Mummified baboons reveal the far reach of early Egyptian mariners. *eLife* 2020

**Grathwohl, F. et al.:** Adulis and the transshipment of baboons during classical antiquity. *bioRxiv – the preprint server for biology*, März 2023

**Hill, C.M.:** Conflict of interest between people and baboons: crop raiding in Uganda. *International Journal of Primatology* 21, 2000

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

[spektrum.de/t/alt-es-aegypten](https://www.spektrum.de/t/alt-es-aegypten)



PAUL CAMPBELL / GETTY IMAGES / ISTOCK

# Das dicke Ende

## Probieren kostet nichts.

Eine Kurzgeschichte von **Louis Evans**

**A**ls die Zahlen in säuberlichen kleinen Paketen aus dem unendlichen All herabrieselten, dachten wir nicht im Traum daran, das dem Präsidenten zu melden. Wir riefen Derek an.

Derek war Milliardär. Damit war er es, der das Sagen hatte. Er war auf die gleiche Weise zu Geld gekommen, wie das die neuen Technik-Superstars heutzutage alle schaffen: erst ein guter Einfall (angeblich auf dem eigenen Mist gewachsen), gefolgt von einer Reihe Investitionen in die guten Ideen anderer Leute.

Dereks Gratismodell – »Probieren kostet nichts, aber wer gewinnen will, muss zahlen« – war der erfolgreichste Zeitvertreib auf dem Markt. Zunächst verhalten sich die Jetons oder Bonbons genau so, wie sie es nach Ihrem Wunsch tun sollen. Und Sie erklimmen mühelos einen Level nach dem anderen. Doch dann wendet sich das Blatt: Jetzt beginnen Sie zu verlieren. Und dann kommt die Einladung: »Möchtest du ein Upgrade? Klick hier!«

Zehn Milliarden Klicks hatten Derek in der Tat steinreich gemacht. Und wie so viele Männer, deren Ehrgeiz mit der Zeit den Horizont des Erdballs überschreitet, begann Derek seinen Blick nach oben zu richten.

Die protzigen Rückstoßraketen eines Elon Musk oder Jeff Bezos waren nicht Dereks Sache. Nein, er wollte höher hinaus. Derek wollte Außerirdische.

Aus diesem Grund kamen wir ihm gerade recht. Unser Institut war in einem erbärmlichen Zustand. Seit einer gefühlten Ewigkeit hatten wir ebenso tapfer wie erfolglos nach außerirdischem Leben gesucht, aber unser Budget schrumpfte immer weiter, denn die Öffentlichkeit interessierte sich nicht mehr für uns. Dennoch waren wir zunächst misstrauisch, als Derek uns sein Angebot unterbreitete. Wir fürchteten um unsere Unabhängigkeit. Die Resultate unserer Forschung würden wir nicht mehr frei veröffentlichen dürfen. Sechs Wochen später fläzte sich Derek in den Drehsessel des Direktors.

So kam es, dass wir auf der Stelle Derek anriefen, als das Signal vom Himmel fiel. Er stieß einen Freudenschrei aus und versprach jedem von uns einen gewaltigen Bonus. Allerdings weigerte er sich, an die Öffentlichkeit zu gehen, und befahl uns, zu warten.

Wir mussten den Tatsachen ins Auge sehen: Da hockten wir auf Dereks privater Insel, während seine Computersicherheitsabteilung das Internet überwachte und seine persönliche Marine jedes auslaufende Boot kontrollierte.

Derek wies uns an, auf die Botschaft der Außerirdischen zu antworten. Wir wandten ein, das sei zwecklos.

Ohne Zweifel, so erklärten wir geduldig, lebten die Außerirdischen viele Lichtjahre entfernt. Es konnte mehrere Zehntausende von Jahren dauern, bis wir ein Antwortsignal empfangen würden. Aber Derek blieb hartnäckig.

Und Sie werden es nicht glauben: Wir bekamen postwendend eine Kopie unseres Signals zurück! Wir sandten Primzahlen; sie schickten uns andere Primzahlen. Dann probierten wir es mit großen zusammengesetzten Zahlen, und sie antworteten mit der Primzahlzerlegung dieser riesigen Beträge. Und zwar in Sekundenschnelle.

Ein solches Bravourstück stellte alle mathematischen und technologischen Fähigkeiten der Menschheit weit in den Schatten. Sämtliche Computer der Erde hätten bis zum Sankt-Nimmerleins-Tag geschuftet, ohne eine einzige Zahl der von uns übermittelten Größe in Primfaktoren zerlegen zu können. Doch für die Außerirdischen muss das so simpel gewesen sein wie zwei mal zwei.

Wir informierten Derek. Er rotierte in seinem körperangepassten Nano-Gewebesystem-Sessel. Dann hielt er inne, legte den Kopf schief und grinste. Die Unmöglichkeit, große Zahlen zu faktorisieren, bildet die Grundlage der meisten modernen Verschlüsselungstechniken. Diese schützen die Geheimnisse von Firmen, Banken und Armeen. Derek wusste das. Es gab Leute, die riesige Summen zahlen würden, um die Primzerlegung beliebiger großer Zahlen zu erreichen. Auch das wusste Derek.

**U**nd somit verkaufte Derek die Aliens als seine Dienstleistung. Er sagte niemandem, dass sein Zaubertrank aus gottähnlichen Wesen bestand, die zwar hinter fernen Sternen wohnten, sich aber mit Radiosignalen binnen Sekunden erreichen ließen.

Im Nachhinein betrachtet hätten wir uns darüber ein bisschen mehr Sorgen machen sollen.

Stattdessen hütete Derek sein Geheimnis. Er gab ausweichende Antworten. Er ließ sich von der CIA nicht in die Karten schauen. Ein dickes Kabel lieferte Verschlüsselungscodes zu unserer Insel, wir strahlten sie zum Himmel und schrieben die Antworten nieder. Derek nahm binnen weniger Wochen fast eine Billion Dollar ein, indem er die Geheimnisse der Welt an deren reichste Schnüffler verkörperte.

Eines Tages bat uns Derek angeblich zum Scherz, den Außerirdischen gewisse Details des Aktienmarkts zu senden. Wir übermittelten die Börsendaten der vergangenen sieben Tage.

Als Antwort erhielten wir die Preise der nächsten Woche. Zwar nicht ganz genau, doch die chaotische



Gischt der Märkte wurde durch die Schätzungen kräftig eingehegt. Bald war der einstige Mogul des Gratis-onlinespiels zum reichsten Mann geworden, den die Welt je gesehen hatte.

Ein vorsichtigerer Unternehmer hätte sich vielleicht gefragt, wie die Außerirdischen ihre Kunststücke fertigbrachten – und wieso sie das taten. Nicht so Derek. Er war, wie er uns selbstgefällig mitteilte, ausschließlich am Produkt interessiert. Die Aliens lieferten zuverlässige Antworten, also funktionierte seine Dienstleistung. Das war alles, worauf es ihm ankam.

Und dann trug Derek uns auf, die Außerirdischen zu fragen, wie er es schaffen könne, Präsident der Vereinigten Staaten zu werden.

Als wir ihre Antwort übersetzten, schockierte uns deren unleugbare Vertrautheit.

»Diese Antwort ist nicht im Rahmen der Gratisspielregeln erhältlich. Möchtest du ein Upgrade?«

Der Preis war der Saturnmond Titan.

Ohne Zweifel, meinten wir, müsste eine derart gewichtige Frage den Parlamenten und Kongressen der Welt zur Diskussion vorgelegt werden.

Aber Derek wollte mit niemandem reden. »Tut es einfach«, sagte er bloß.

Innerhalb von drei Jahren war er Präsident. Unsere elektronischen Briefkästen wurden mit Fragen überschwemmt. »Wie kann ich meinen politischen Rivalen kaltstellen?« – »Wie kann ich diese Regatta gewinnen?« – »Wie kann ich diesen Popstar verführen?«

Wir bezahlten mit Uranus, Neptun, Saturn und Jupiter. Wir verkauften Mars und Venus und Merkur. Wir gaben ihnen die Sonne. Wir verpfändeten die Antarktis und Australien, Afrika, Eurasien, Nord- und Südamerika. Wir verscherbelten jedes Stück Land auf der Erde bis auf diese kleine Insel. Und nur wir wussten, dass das gesamte Sonnensystem bei Mächten, die unsere Vorstellungskraft bei Weitem überstiegen, massiv in der Kreide stand.

Darum überraschte uns der Anblick nicht besonders, als wir eines Morgens aus unserem bescheidenen Gemeinschaftsquartier traten und uns den Schlaf aus den Augen rieben. Über uns hingen Raumschiffe am Himmel, so groß und unerschütterlich wie Berge. Wir wussten, sie waren gekommen, um die Schulden einzutreiben.

Probieren ist gratis, aber wer gewinnen will, muss zahlen. ◀

## DER AUTOR

**Louis Evans** ist Schriftsteller und lebt in New York. Zuvor arbeitete er fünf Jahre lang im Großraum San Francisco für Start-up-Unternehmen im Technologiebereich.

## nature

© Springer Nature Limited

[www.nature.com](http://www.nature.com)

Nature, Published online 31. März 2021

## 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 Heinkelmann, 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

**Übersetzung:** An diesem Heft wirkte mit: Dr. Markus Fischer

**Leser- und Bestellservice:** Estefanny Espinosa de Rojas, 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 € 9,80 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 105,60; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 82,10. PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

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

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

**Anzeigen:** E-Mail: [anzeigen@spektrum.de](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. 44 vom 1.1. 2023.

**Gesamtherstellung:** L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2023 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

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

ISSN 0170-2971

### SCIENTIFIC AMERICAN

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

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





SAMMIESTERKE / GETTY IMAGES / ISTOCK, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## Der frühe Kosmos im Labor

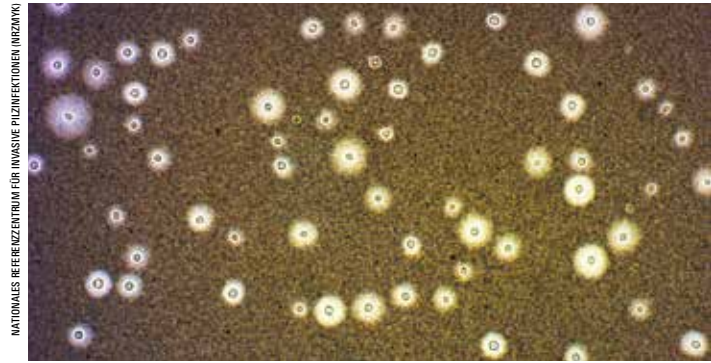
Manche Details der Expansion beim Urknall lassen sich experimentell nachstellen – durch die geschickte Manipulation ultrakalter Atomwolken. Das könnte mehr über die Anfangsphase des Alls verraten.

## Als die Menschen laufen lernten

Für die Vorfahren von *Homo sapiens* führte der Evolutionsweg zum Zweibeiner über teils recht verschlungene Pfade.



JEREMY DE SILVA



NATIONALES REFERENZENTRUM FÜR INVASIVE PILZINFESTIONEN (INIZAVI)

## Unterschätzte Erreger

Pilzinfektionen sind in der Medizin eher ein Randthema. Doch die Fallzahlen steigen. Zwei Experten erläutern, welche Gefahr von krank machenden Pilzen droht und warum wir bessere Überwachungsprogramme brauchen.



EADZ / ISTOCK.ADOBE.COM

## Extremereignisse im Ozean

Hitzewellen oder lokale Versauerungen treten in den Meeren zunehmend gemeinsam auf. Erst allmählich beginnen Fachleute die kombinierten Phänomene zu verstehen.

### 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://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)

PLANKTON

# Verborgene Wanderungen

Nacht für Nacht steigen Myriaden von Kleinstlebewesen aus den Tiefen des Meeres hinauf, um dann wieder hinabzusinken. Diese koordinierten Wanderzüge wirken sich auf die gesamte Biosphäre unseres Planeten aus.



**Katherine Harmon Courage** ist Wissenschaftsjournalistin und freie Mitarbeiterin bei »Scientific American«. Sie lebt in Longmont (US-Bundesstaat Colorado).

## KLEINE WANDERER

Unzählige Kleinstlebewesen des Zooplanktons schwimmen Nacht für Nacht aus den Tiefen des Meeres an die Oberfläche und dann wieder zurück. Jede Spezies folgt dabei ihrem eigenen Rhythmus, der nach Jahreszeit sowie nach Alter und Geschlecht des einzelnen Tieres variieren kann.

Jeden Abend schweben Billionen kleinster Meerestiere – etliche davon winziger als ein Reiskorn – in hunderten Meter Tiefe und warten auf ihr Signal. Dieses Zooplankton (griechisch: Zoon = Tier; plagktós = umherirrend) galt lange als Ansammlung passiver Wesen, die lediglich von den Gezeiten und Strömungen umhergetrieben werden. Doch weit gefehlt: Kurz vor Sonnenuntergang machen sich die Schwärme unbemerkt auf den Weg in Richtung Wasseroberfläche.

Während des Aufstiegs schließen sich mehr und mehr solcher Planktonorganismen wie Ruderfußkrebse, Krill, Salpen oder Fischlarven der Wanderung an. Die Nacht verbringen sie an der Wasseroberfläche, aber wenn morgens das erste Sonnenlicht aufs Meer fällt, sind sie bereits wieder unterwegs in die Tiefe. Während der Sonnenaufgang alle 24 Stunden von Ost nach West gleitet – vom Indischen Ozean über den Atlantik zum Pazifik –, unternehmen die Schwärme nacheinander dieselbe Reise hinab und wieder zurück nach oben.

Die meisten Menschen ahnen nichts vom täglichen Auf und Ab in den Weltmeeren, das als tagesperiodische Vertikalwanderung bezeichnet wird. Dabei handelt es sich um die größte regelmäßige Migration von Lebewesen auf unserem Planeten: Fachleute schätzen die dabei bewegte tierische Biomasse auf etwa eine Milliarde Tonnen. Einige der beteiligten Spezies steigen aus über 1000 Meter Tiefe auf. Eine erstaunliche Leistung – entspräche doch eine vertikale Wegstrecke von 300 Metern, die eine millimetergroße Fischlarve in nur einer Stunde zurücklegt, beim Menschen fast 100 Kilometern. Auf ihrer Pendeltour durchqueren die Tiere Meeresszonen mit völlig unterschiedlichen Bedingungen: In einer Tiefe von 300 Metern herrscht ein Wasserdruck von 30 Bar, die Wassertemperatur beträgt etwa 4 Grad Celsius. In den Wellen ganz oben liegt dagegen ein Druck von lediglich einem Bar vor,

und das Wasser ist womöglich 15 Grad warm. Warum machen sich so viele winzige Tiere Tag für Tag auf eine solch beschwerliche Reise?

Die kurze Antwort lautet: um zu fressen und um nicht gefressen zu werden. Tagsüber verbirgt sich das Zooplankton in den dunklen Tiefen des Meeres vor Raubtieren wie Kalmaren oder Fischen. Sobald die Nacht anbricht, wandern die kleinen Meerestiere Richtung Wasseroberfläche und vertilgen dort im Schutz der Dunkelheit Phytoplankton - mikroskopisch winzige, teils einzellige Wasserpflanzen, die in den obersten, tagsüber von Licht durchfluteten Schichten leben.

Doch das ist nur der Hauptstrom der Wanderzüge. Daneben gibt es noch zahlreiche Quer- und Kreisbewegungen. Mit Hilfe hochauflösender Sonargeräte, autonomer Unterwasserfahrzeuge und modernster Techniken der DNA-Sequenzierung untersuchen Forscherinnen und Forscher nun, wie diese Abläufe das Nahrungsnetzwerk der Ozeane, den globalen Kohlenstoffhaushalt sowie die gesamte Biosphäre beeinflussen.

### Wandernder Meeresboden

Die ersten Beobachtungen der tagesperiodischen Vertikalwanderungen stammen aus dem Zweiten Weltkrieg. Marinesoldaten, die mit Sonargeräten die Ozeane nach feindlichen Unterseebooten absuchten, entdeckten Merkwürdiges: Teile des Meeresbodens schienen in langsamem Rhythmus ihre Tiefe zu verändern. Eine »Streuschicht«, die Sonarsignale reflektierte, bewegte sich täglich um bis zu 1000 Meter auf und ab – ein zunächst unerklärliches Phänomen. Nach Kriegsende begann der Ozeanograf Martin Johnson (1893–1984) von einem Forschungsschiff aus, zu unterschiedlichen Tageszeiten in verschiedenen Meerestiefen Planktonproben zu sammeln. »Aus diesen vorläufigen Beobachtungen geht hervor, dass ein direkter Zusammenhang zwischen den Planktontieren und der Streuschicht besteht«, schrieb er 1948.

Die Idee, die rätselhafte Schicht könne aus Lebewesen bestehen, warf jedoch weitere, schwierig zu beantwortende Fragen auf. Schließlich sind die beteiligten Tiere winzig klein, sie unternehmen ihre Wanderungen im Dunkeln und die tiefen Zonen des Ozeans bleiben schwer zugänglich. Schwärme mückengroßer Organismen in lichtlosen Tiefen zu beobachten, erwies sich als kniffliger, als Wale bei ihren Wanderungen über die Erdhemisphären hinweg zu verfolgen. Erst in den 1990er Jahren konnten modernere Sonargeräte mit höherer Auflösung einzelne Tiergruppen und subtilere Bewegungsmuster erfassen. Damit ließ sich allerdings nicht unterscheiden, welche Arten der winzigen Tiere jeweils unterwegs sind. Anhand von Wasserproben konnten Biologen wie Johnson zwar die beteiligten Planktonspezies bestimmen. Dabei blieben aber die zeitlichen und örtlichen Nuancen unberücksichtigt, so dass nicht klar wurde, wohin die Reise der einzelnen Tiere jeweils ging.

Trotz dieser Hemmnisse gelang es, verborgene Feinheiten der massenhaften Migrationen aufzuklären. So ist

## SERIE OZEANE

TEIL 1: MÄRZ 2023

### Heilkraft aus dem Meer

Stephanie Stone

TEIL 2: APRIL 2023

### Der neue Klang der Ozeane

Tim Kalvelage

TEIL 3: MAI 2023

### Das Geheimnis des Meeresleuchtens

Michelle Nijhuis

### ▸ Verborgene Wanderungen

Katherine Harmon Courage

TEIL 4: JUNI 2023

### Extremwetter in den Ozeanen

Thomas Frölicher

das Phänomen offenbar eng mit dem Geschehen am Himmel verknüpft: Wenn die Sonne im Polarwinter wochenlang ausbleibt, richten etliche Tiere ihre Wanderungen nach dem Mondzyklus aus. Auch eine Sonnenfinsternis kann sie dazu veranlassen, Richtung Oberfläche zu schwimmen. Eine leichte Bewölkung genügt und das Zooplankton in Meerestiefen unterhalb von 300 Metern, wo die Lichtintensität auf 0,012 Prozent abfällt, verschiebt seine vertikale Position um bis zu 60 Meter, erklärt Deborah Steinberg vom Virginia Institute of Marine Science. Dabei waren die veränderten Beleuchtungsbedingungen für die Mannschaft an Bord ihres Forschungsschiffs gar nicht erkennbar, bemerkt die Biologin: »Für uns war jeder Tag auf See bedeckt, grau und nieselig.« Doch das Zooplankton in der Tiefe registrierte offenbar selbst subtile Schwankungen der Lichtverhältnisse.

Mittels autonomer Unterwasserfahrzeuge lassen sich heute Bilder aus der Tiefe mit Umweltdaten verknüpfen. Forscherinnen und Forscher wie Kelly Benoit-Bird vom Monterey Bay Aquarium Research Institute und Mark Moline von der University of Delaware gewinnen so neue Einblicke in die Migrationen aus der Perspektive der beteiligten Organismen. Sonarmessungen von vertikal wanderndem Zooplankton im Catalina-Becken vor Kalifornien aus 300 Meter Tiefe zeigten Überraschendes: Die Tiere waren offenbar in gut abgegrenzten Clustern organisiert, die nach Spezies geordnet aufstiegen.

»Wir sollten das nicht mehr als simple Massenströmung betrachten, sondern als eine individuelle und artspezifische Aktivität«, sagt Benoit-Bird über die Vertikalwanderungen. Und das wanderfreudige Zooplankton ist bei seinen nächtlichen Ausflügen längst nicht allein. »Zahlreiche Tiere nutzen diese Strategie«, betont die Meeresbiologin. Mollusken, Laternenfische, Staatsquallen und verschiedenste andere Tiefseetiere machen sich ebenfalls nachts auf den Weg, um ihren Fressfeinden zu entgehen oder um Beute zu jagen – etwa andere Vertikalwanderer.

### Fehlende Nährstoffe

Doch nicht nur Tiere begeben sich routinemäßig auf Wanderschaft. Schon seit Jahrzehnten ist bekannt, dass sich zahlreiche Spezies des pflanzlichen Planktons ebenfalls in der Senkrechten fortbewegen – sei es, indem sie ihren Auftrieb durch Fettabsonderung oder Größenveränderung regulieren; sei es, indem sie mit Geißeln schlagen. Betrachtet man den Ozean im Profil, so gibt es an der Oberfläche viel Sonnenenergie, aber wenig Nährstoffe. In die tieferen bodennahen Zonen hingegen dringt nicht genug Licht für die Fotosynthese betreibenden Algen vor; andererseits findet sich dort unten eine Fülle von Nährstoffen. Wie Forscher um den Ökosystemmodellierer Kai Wirtz vom Institut für Küstensysteme in Geesthacht 2016 berechneten, reicht die Zirkulation des Ozeanwassers allerdings nicht aus, um genügend Stickstoff und Phosphor aus der Tiefe nach oben zu transportieren und so

## AUF EINEN BLICK

# Massenmigration

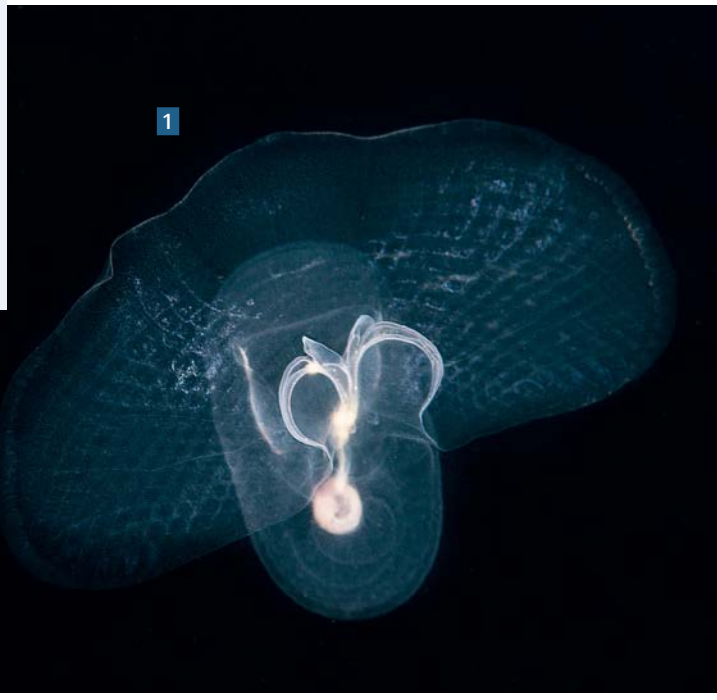
- 1** Jede Nacht steigen Vertreter des Zooplanktons aus größeren Meerestiefen nach oben, um an der Wasseroberfläche Phytoplankton abzuweiden.
- 2** Tagsüber sinken sie wieder hinab. Ein Teil des Phytoplanktons unternimmt entgegengesetzte Wanderzüge, um Nährstoffe in der Tiefe zu nutzen oder um dem Zooplankton auszuweichen.
- 3** Diese tagesperiodische Vertikalwanderung transportiert enorme Mengen Kohlenstoff in die Tiefsee und beeinflusst so maßgeblich das Klima auf der Erde.

den riesigen und für das Leben auf der Erde essenziellen Phytoplanktonteppich an der Oberfläche mit ausreichend Nährstoffen zu versorgen. Warum also, dachte Wirtz, sollten nicht auch die pflanzlichen Meeresbewohner ihre gut entwickelten Fortbewegungsmöglichkeiten nutzen, um zwischen den beiden Zonen hin und her zu pendeln? Tatsächlich, so sagt er, »ist dies die einzig plausible Erklärung«.

Nach Wirtz' Schätzungen dürfte die Hälfte der marinen Phytoplanktonarten regelmäßige vertikale Wanderungen von bis zu 100 Metern unternehmen, um Nährstoffe von unten und Sonnenlicht von oben zu nutzen. Die mikroskopisch kleinen Organismen könnten für solche Reisen Stunden, Tage oder gar Wochen brauchen, wobei sich einige von ihnen unterwegs fortpflanzen und es ihren Nachkommen überlassen, das Ziel zu erreichen. Solche Erkenntnisse veränderten radikal das wissenschaftliche Verständnis über das Phytoplankton, das bislang eher undifferenziert betrachtet wurde statt als komplexe Gemeinschaft zahlloser Einzelorganismen mit diversen Verhaltensweisen.

Laboruntersuchungen bestätigten nicht nur, dass sich Vertreter des pflanzlichen Planktons vertikal im Wasser bewegen, sondern zeigten zudem, wie sie dabei ihr Verhalten hervorragend an die jeweiligen Bedingungen anpassen können: Ein Team der Washington State University um Stephen Bollens setzte in zwei Salzwassertanks Dinoflagellaten ein, die einen wesentlichen Teil des marinen Phytoplanktons darstellen. In einen der beiden Behälter entließ es zusätzlich räuberische Ruderfußkrebse. Wenn die Beleuchtung einen typischen Tag-Nacht-Zyklus simulierte, schwammen die hungrigen Krebse erwartungsgemäß bei Dunkelheit zur Oberfläche und bei Licht hinunter. Das Phytoplankton in den beiden Behältern verhielt sich genau umgekehrt: »Tagsüber« bewegte es sich nach oben und »nachts« hinab in die Tiefe – um einerseits möglichst viel Lichtenergie einzufangen und

**MIKROSKOPISCHER REIGEN** Die Menagerie des Zooplanktons umfasst eine hochdiverse Vielfalt winziger Tiere: Ein zu den Schnecken gehörender Seeschmetterling (*Corolla spectabilis*) aus der See vor den Kanarischen Inseln **1**; ein Ruderfußkrebs (*Euaugaptilus antarcticus*) **2**; ein Pfeilwurm, der in allen Ozeanen in sämtlichen Tiefen vorkommt **3**; blau lumineszierendes Plankton aus der Arktis **4**.



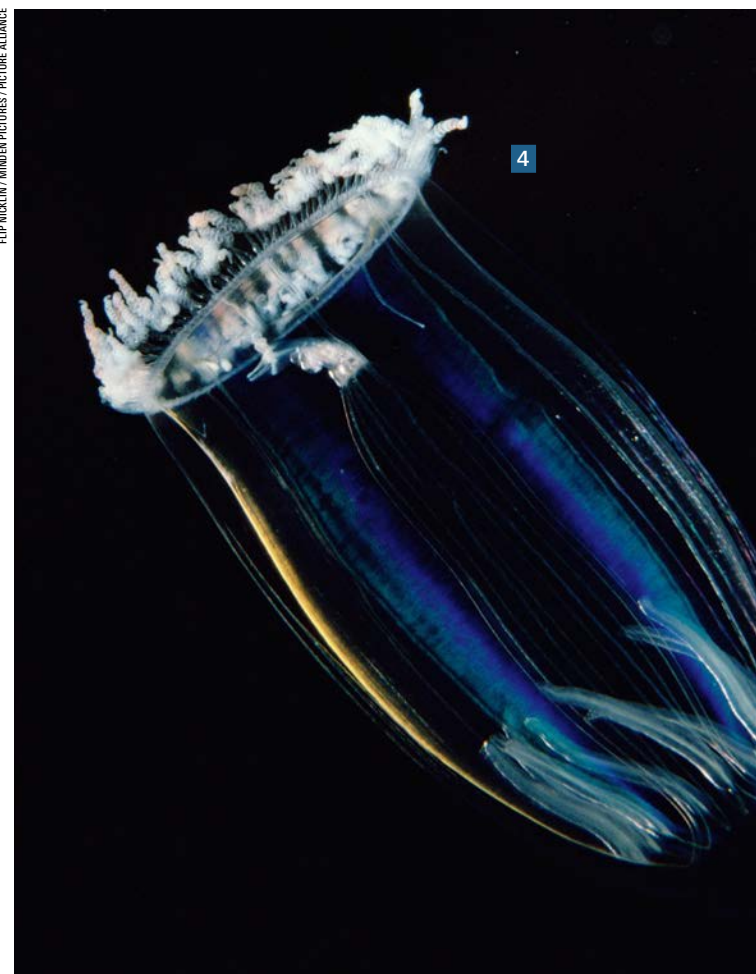
ALAMY / BIOSPHOTO / SERGIO HANOUET



INGO ARNDT / MINDEN PICTURES / PICTURE ALLIANCE



ALBERT LLEAL / MINDEN PICTURES / PICTURE ALLIANCE



FLIP NICKLIN / MINDEN PICTURES / PICTURE ALLIANCE

andererseits dem Risiko auszuweichen, von nachtaktiven Räubern gefressen zu werden.

Zum Erstaunen der Forscher zogen sich die Dinoflagellaten im Tank mit den Ruderfußkrebse bei Dunkelheit sogar in noch tiefere Zonen zurück als im Becken ohne Fressfeinde – und gewannen so einen möglichst großen Abstand zu ihnen. Niemand weiß, wie die pflanzlichen Einzeller das Verhalten der Räuber registrieren. Doch laut den Studienautoren »könnte diese hier erstmals beschriebene Verhaltensreaktion wichtige ökologische Konsequenzen haben«.

### Biologisches Förderband

Als sicher gilt jedenfalls, dass die Phytoplanktonwanderungen das Klima beeinflussen. Deborah Steinberg und ihre Kollegen hatten in den 1990er Jahren versucht, die globale Kohlenstoffbilanz mariner Ökosysteme zu ermitteln, also die Differenz der Menge an Kohlenstoffdioxid, die in die Atmosphäre abgegeben und die ihr entzogen wird. Die Zahlen schienen nicht zu stimmen: Es verschwand mehr Kohlenstoff von der Meeresoberfläche, als die Berechnungen erwarten ließen.

Durch ihre Forschungsarbeit am Bermuda Institute of Ocean Sciences hatte Steinberg bei zahlreichen Tauchgängen die dort tagsüber zu beobachtende Meeresfauna gut kennen gelernt. Dann tauchte sie einmal in der Nacht. Nachdem sie von einem kleinen Boot aus in das dunkle Wasser gesprungen war, das sich fast 4000 Meter tief unter ihr erstreckte, fand sie sich plötzlich in einer ganz anderen Welt als tagsüber wieder. »Ich schwamm inmitten von Tieren der unterschiedlichsten Arten«, erinnert sie sich mehr als ein Vierteljahrhundert danach noch voller Begeisterung.

Diese Nacht veränderte Steinbergs wissenschaftliche Laufbahn. Sie beschloss, von nun an die täglichen Wanderungsbewegungen im Meer zu studieren. Dabei ahnte sie bereits, dass hier ein Schlüssel zur Erklärung der unplausiblen Kohlenstoffbilanz liegen könnte. Denn an der Meeresoberfläche nimmt das Phytoplankton eine enorme Menge an Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre auf, gibt aber einen Großteil davon bald wieder – oft binnen weniger Tage – an die Luft ab. Wenn nun das auf- und abwandernde Zooplankton nachts an der Oberfläche Phytoplankton frisst, fungiert es als eine Art biologisches Förderband, das gebundenen Kohlenstoff in die Tiefsee transportiert, wo er für Hunderte oder gar Tausende von Jahren gespeichert bleibt.

Um den Kohlenstofftransport näher zu untersuchen, verbringt der Planktonexperte Michael Stukel von der Florida State University viel Zeit damit, die Exkremate von Zooplankton unter dem Mikroskop zu betrachten. So winzig die einzelnen Fäkalpartikel auch sein mögen, spielen sie doch eine globale biogeochemische Rolle, wenn sie massenhaft produziert werden. Die kohlenstoffreichen Ausscheidungen sinken durch die Wassersäule in die Tiefe. Andere biologische Partikel gesellen sich dazu und bilden gemeinsam eine Art »Meeresschnee«, der langsam, aber stetig auf den Meeresboden rieselt. Zu-

sammen mit dem schwimmenden Zooplankton selbst, das seine kohlenstoffhaltigen Mahlzeiten mit hinunternimmt, sorgt diese Bindung von Kohlenstoff dafür, dass es auf unserem Planeten »nicht so heiß ist, wie es sonst wohl wäre«, betont Stukel.

Die Schätzungen, welche Kohlenstoffmengen wandernde Meeresorganismen binden, gehen weit auseinander, denn viele Aspekte des täglichen Auf und Ab sind noch ungeklärt. Deren Erforschung wird dazu beitragen, die globalen Klimamodelle zu verbessern, womit sich wiederum exakter vorhersagen lässt, wie der Klimawandel das Verhalten der marinen Wanderer – und damit das Erdklima selbst – verändert.

Antworten auf solche Fragen könnten die Forschungen aus Kakani Katijas Labor am Monterey Bay Aquarium Research Institute liefern. Die Bioingenieurin nutzt autonome Unterwasserfahrzeuge mit stereoskopischen Kameras, um die Bewegungen einzelner Migrantenaufzuzeichnen. Dank Bildverarbeitungsalgorithmen kann der schwimmende Roboter selbstständig ein einzelnes Tier orten und stundenlang verfolgen.

Katijas Team optimierte diese Technik anhand von Staatsqualen. Die gallertartigen Wesen, die durch ihr halbtransparentes Gewebe geisterhaften Würmern ähneln, bewegen sich schnell und unvorhersehbar. Das erschwert die autonome Verfolgung – und genau die ist Katijas Ziel: »Wir versuchen, die Funktion des Systems zuverlässiger zu gestalten.« Um brauchbare Bilder und Videos aufzunehmen, muss der Roboter aktiv schwimmen und seine Umgebung beleuchten. Beides beeinflusst womöglich das Verhalten der verfolgten Organismen – »ein großes Problem«, wie Katija einräumt. Mit rotem Licht, das die meisten Tiere schlecht wahrnehmen, sowie mit einer turbulenzarmen Fahrweise versuchen die Forscher, ihr Gerät möglichst unauffällig durchs Wasser zu manövrieren. Satelliten tragen zusätzlich dazu bei, die nachts zum Fressen aufgetauchten Planktonschwärme störungsfrei zu beobachten. Ausgestattet mit der Fernerkundungstechnik Lidar (Light detection and ranging) kann man so bis zu 20 Meter tief ins Wasser blicken.

### Genetische Marker

Um die räumlich-zeitlichen Bewegungsmuster der verschiedenen Spezies zu messen, durchkämmen Meeresforscher und -forscherinnen die Wassersäule auch nach genetischen Spuren der auf- und abschwimmenden Organismen. Im Golf von Mexiko ließen Wissenschaftler um Cole Easson von der Middle Tennessee State University von ihrem Schiff große Sammelflaschen in verschiedene Wassertiefen ab, während sie gleichzeitig mit Sonartechnik die Verteilung der Organismen im Wasser registrierten. Mittels DNA-Analyse der gewonnenen Wasserproben bestimmten sie dann, welche Spezies sich wann und wo aufgehalten hatten. Wie die 2020 veröffentlichten Daten zeigten, war das mikroskopisch kleine Zooplankton durch Ruderfußkrebse, Nessel- und Manteltiere viel stärker vertreten als die im Sonar leichter erfassten Fische oder andere relativ große Organismen.



Die Fachleute sind sich einig, dass ein globales Netzwerk die Wanderungsprozesse laufend beobachten sollte, um die Funktionssysteme des marinen Lebens genauer zu verstehen, bevor sie der Mensch noch stärker beeinträchtigt. Die industrielle Fischerei lief bisher fast ausschließlich in der Oberflächenschicht des Ozeans ab, wobei seit einiger Zeit Grundschleppnetze ebenfalls eingesetzt werden. Doch immer mehr Länder wie Norwegen oder Pakistan erteilen kommerzielle Fangerlaubnisse auch für die mittleren Tiefen, um unter anderem hier wanderndes Plankton einzusammeln und zu Fischfarmfutter oder zu Fischöl zu verarbeiten.

Die Ausbreitung toter und sauerstoffarmer Zonen in den tieferen Meeresschichten raubt dem Zooplankton die tagsüber genutzten Lebensräume. Und auf Grund des Klimawandels verringert sich die Durchmischung der Wasserschichten im offenen Meer, wodurch weniger Nährstoffe für das Phytoplankton zur Verfügung stehen. Weniger Phytoplankton bedeutet aber wiederum weniger Nahrung für das wandernde Zooplankton. All das beunruhigt zunehmend die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die diese Tiere erforschen. »Wir haben nicht oft die Gelegenheit, ein ökologisches System zu verstehen, bevor es ausgebeutet wird«, meint Kelly Benoit-Bird. »Es ist ein Wettlauf gegen die Zeit.«

Um die Bewegungen von Billionen Ruderfußkrebse, Krill und den anderen nur schwer fassbaren Migranten besser zu verstehen, werden Benoit-Bird und ihre Kollegen auch im nächsten Sommer wieder auf See gehen. Ihre Expeditionen mit Unterwasserrobotern, Sonartechnik und DNA-Analysen sollen dazu beitragen, herauszufinden, wie sich die winzigen Meerestiere Tag für Tag verhalten – wie sie hinauf- und hinabtauchen, sich in Schwärmen zusammenschließen, sich wieder verteilen und mit den Netzwerken anderer Arten verbunden bleiben.

In der Zwischenzeit wird die Sonne weiter auf- und untergehen. Dabei werden unzählige Meeresbewohner dem Rhythmus von Licht und Dunkelheit folgen, sich ernähren, Stoffwechselprodukte ausscheiden und das ökologische Gleichgewicht auf unserem Planeten maßgeblich beeinflussen. ◀

## QUELLEN

- Benoit-Bird, K. J., Moline, M. A.:** Vertical migration timing illuminates the importance of visual and nonvisual predation pressure in the mesopelagic zone. *Limnology and Oceanography* 66, 2021
- Bollens, S. M. et al.:** Predator-enhanced diel vertical migration in a planktonic dinoflagellate. *Marine Ecology Progress Series* 447, 2012
- Eason, C. G. et al.:** Combined eDNA and acoustic analysis reflects diel vertical migration of mixed consortia in the Gulf of Mexico. *Frontiers in Marine Science* 7, 2020
- Johnson, M. W.:** Sound as a tool in marine ecology, from data on biological noises and the deep scattering layer. *Journal of Marine Research* 7, 1948
- Mandal, S. et al.:** A 1D physical–biological model of the impact of highly intermittent phytoplankton distributions. *Journal of Plankton Research* 38, 2016
- Omand, M. M. et al.:** Cloud shadows drive vertical migrations of deep-dwelling marine life. *PNAS* 118, 2021
- Steinberg, D. K., Landry, M. R.:** Zooplankton and the ocean carbon cycle. *Annual Review of Marine Science* 9, 2017
- Wirtz, K., Smith, S. L.:** Vertical migration by bulk phytoplankton sustains biodiversity and nutrient input to the surface ocean. *Scientific Reports* 10, 2020

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

# Die Mathematik der Fairness

Egal ob Menschen oder Maschinen Entscheidungen treffen: Es besteht immer die Gefahr, dass bestimmte Gruppen benachteiligt werden. Lässt sich Fairness überhaupt erreichen? Probieren Sie es am Computer aus!

► Interaktiver Beitrag online unter: <https://www.spektrum.de/pix/interactive/mathematik-der-fairness/>



Text: Christoph Drösser

Grafiken und Programmierung: Jonas Parnow

► Im Jahr 2015 geriet Amazon in die Kritik. Es ging um den neuen »same-day delivery service«, die Auslieferung von Bestellungen mancher Produkte noch am selben Tag. Der Dienst wurde in den USA nicht landesweit eingeführt, sondern nur in ausgewählten Postleitzahl-Bezirken. Und in denen wohnten vorwiegend weiße, gut betuchte Kunden. Der Firma wurde vorgeworfen, ihre Auswahl sei rassistisch und benachteilige Menschen dunkler Hautfarbe. Amazon hielt dagegen: »Wir wissen nicht, wie unsere Kunden aussehen.« Die Hautfarbe habe bei der Entscheidung keine Rolle gespielt.

Das Beispiel zeigt: Wenn eine Entscheidung bestimmte gesellschaftliche Gruppen benachteiligt, muss die »sensible Eigenschaft« dieser Gruppen, also etwa Hautfarbe oder Geschlecht, nicht explizit eine Rolle gespielt haben. Amazon hat wahrscheinlich Größen wie das durchschnittliche Haushaltseinkommen oder die Entfernung vom nächsten Warenlager in seine Entscheidung einfließen lassen. Aber die korrelieren nun mal häufig mit der Hautfarbe der Bewohner.

Egal ob Menschen oder Maschinen Entscheidungen treffen, es besteht immer die Gefahr, dass bestimmte Gruppen benachteiligt werden. Maschinelle Verfahren treffen ihre Entscheidungen nach mathematischen Prinzipien (die nicht immer durchschaubar sind), Menschen lassen bei ihren Entscheidungen Emotionen und »Bauchgefühl« einfließen. Das eine ist nicht grundsätzlich fairer als das andere. In beiden Fällen sollte man das Ergebnis der Entscheidungen hinterfragen können.

Damit das gelingt, muss man Entscheidungsprozesse nachvollziehen. Dafür werden wir uns mehreren Beispielen widmen, in denen über das Schicksal von Menschen entschieden wird – und Sie können am Computer mitmachen! Aus einer großen Anzahl von Personen sollen diejenigen herausgesucht werden, die ein bestimmtes Wunschkriterium erfüllen: Angestellte, die für einen Job hervorragend geeignet sind. Straftäter, die man frei lassen kann, weil sie kein neues Verbrechen begehen werden. Kreditwürdige Bankkunden, die pünktlich ihre Raten zahlen.

Der Einfachheit halber nehmen wir dafür an, dass jeder Mensch das jeweilige Kriterium entweder erfüllt oder nicht erfüllt. Idealerweise finden wir einen Filter, der genau diejenigen herauspicks, die zur Wunschmenge gehören, und die anderen außen vor lässt. Doch das ist in der Praxis meistens unmöglich, weil wir nur unvollständige Kenntnisse über Menschen haben und sich Einschätzungen meist auf die Zukunft beziehen.

Algorithmen benutzen deshalb einen so genannten Classifier, der eine gewünschte Eigenschaft einschätzen soll. Dabei kommt es unweigerlich zu Fehlurteilen: Menschen werden fälschlich als »positiv« deklariert, auch wenn sie das Kriterium nicht erfüllen, oder umgekehrt als »negativ«, obwohl sie sehr wohl zu der Wunschmenge gehören. Das sind Einzelfälle, bei denen die Entscheidungen nicht fair waren.

Uns interessiert aber vor allem, ob ganze Gruppen systematisch falsch klassifiziert werden. Haben People of Color schlechtere Chancen, einen Kredit zu bekommen? Werden Frauen bei der Jobsuche benachteiligt? Das wollen wir an Beispielen untersuchen.

Das erste Beispiel ist fiktiv. Es geht um eine mögliche Geschlechterdiskriminierung in einer Branche, die ohnehin schon männerdominiert ist. Ein Start-up will Programmiererinnen oder Programmierer einstellen und dafür eine digitale Anzeige in sozialen Medien schalten, also nicht in einem Fachforum. Um kein Geld zu verschwenden, sollen nicht alle Nutzerinnen und Nutzer die Anzeige sehen. Stattdessen wird der Adressatenkreis – wie heute üblich – auf Grund gewisser persönlicher Eigenschaften eingeschränkt, um eine höhere Trefferquote zu erreichen.

Das Start-up bezahlt dafür, dass die Anzeige 2000 Menschen präsentiert wird. Für die Firma ist es also wichtig, dass unter diesen 2000 Personen möglichst viele Programmiererinnen und Programmierer sind. Diese Quote wird die **Präzision** der Anzeigenschaltung genannt. Sie soll am Ende möglichst nahe bei 100 Prozent liegen.

Es ist allgemein bekannt, dass (aus Gründen, die wir in dieser Anwendung nicht weiter untersuchen) mehr Männer den Programmiererberuf ergreifen als Frauen. Nehmen wir dafür folgende, rein hypothetische Zahlen an:

**5 Prozent aller Männer sind Programmierer**

**1,2 Prozent aller Frauen sind Programmiererinnen**

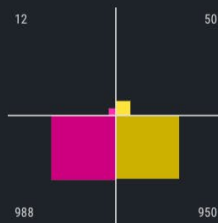
Dann sind unter 2000 zufällig herausgegriffenen Erwachsenen (1000 Männer, 1000 Frauen) etwa 50 männliche und 12 weibliche Programmierer. Zeigt man die Anzeige den Usern ohne irgendwelche Einschränkungen, dann beträgt die Präzision der Kampagne 62/2000, also **3,1 Prozent**.



0  
Personen nicht gezeigt

2.000  
Personen gezeigt

ANZEIGE GEZEIGT



PRÄZISION

Wie viele von denen, die die Anzeige gesehen haben, sind Programmierinnen und Programmierer?



Das ist eine sehr magere Ausbeute. Wir suchen also nach einem Classifier, der nach gewissen Regeln bestimmte Nutzerinnen und Nutzer herausfiltert und vorrangig ihnen die Anzeige präsentiert. Unter diesen Personen sollen möglichst viele Programmierinnen und Programmierer sein.

Ideal wäre es, wenn man genau wüsste, ob ein User oder eine Userin programmiert, etwa weil diese Eigenschaft im persönlichen Profil auf der Plattform eingetragen wurde. Dann könnten die Firma einen Filter einsetzen und sagen: Zeigt die Stellenanzeige nur diesen Nutzerinnen und Nutzern. Die von diesem Classifier herausgefilterten Menschen wären exakt diejenigen, denen wir die Anzeige präsentieren wollen.

Diese Information haben wir allerdings nicht. Wir müssen daher versuchen, andere Eigenschaften zu finden, die die Chance erhöhen, dass eine Userin oder ein User Programmierkenntnisse hat.

Es gibt ein einfaches Mittel, die Präzision zu erhöhen: Man zeigt die Anzeige nur männlichen Besuchern der Website. Greift man davon 2000 zufällig heraus, dann sind darunter etwa 100 Programmierer – die Präzision steigt auf 100/2000, also **5 Prozent**.

Abgesehen davon, dass dieser Wert immer noch nicht besonders gut ist, ist zudem offensichtlich, dass hier klar diskriminiert wird und die Schaltung der Anzeige nicht fair ist. Keine einzige Programmiererin bekommt sie schließlich auf diesem Weg zu sehen. Das Start-up will sich auf keinen Fall dem Vorwurf aussetzen, Frauen zu benachteiligen – also vergessen wir diesen Plan ganz schnell wieder.

Was wäre aber nun eine faire, nichtdiskriminierende Form, die Anzeige zu schalten? Sie haben die Wahl zwischen zwei Alternativen:

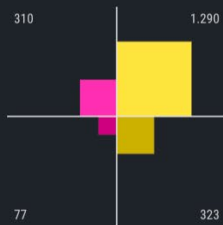
1. Gleich viele Frauen und Männer sollen die Anzeige sehen.
2. Die Chance, die Anzeige zu sehen, soll für männliche und weibliche Programmierer gleich sein.

Das soziale Netzwerk, in dem die Anzeige geschaltet wird, erfasst das Surfverhalten der User und Userinnen im Netz. Viele Coderinnen und Coder treiben sich zum Beispiel im Github-Forum herum, auf dem man Programme speichern und mit anderen teilen kann. Die überwiegende Mehrheit der Nutzer sind Programmierinnen und Programmierer (für unser Beispiel nehmen wir an: 80 Prozent). Außerdem ist das Forum unter männlichen und weiblichen Softwareentwicklern gleich beliebt.

Was ist, wenn man die Anzeige nur denjenigen zeigt, die auf Github aktiv sind? Dann kommt Folgendes heraus:



ANZEIGE GEZEIGT



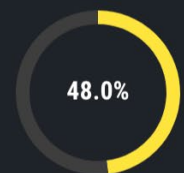
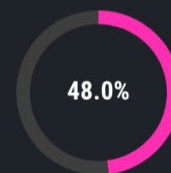
PRÄZISION

Wie viele von denen, die die Anzeige gesehen haben, sind Programmierinnen und Programmierer?



RICHTIG-POSITIV-RATEN

Wie groß ist die Chance einer Programmiererin / eines Programmierers, die Anzeige zu sehen?



80 Prozent Präzision – da freut sich der Auftraggeber. Doch ist das fair? Anders gefragt: Hatten Programmierinnen unter den Besuchern der Social-Media-Website dieselbe Chance, die Anzeige zu sehen? Dazu müssen wir auf die Richtig-positiv-Rate schauen. Die drückt aus, welchen Anteil an Menschen mit der gewünschten Eigenschaft der Classifier auswählt. Im genannten Beispiel beträgt sie für Männer und Frauen jeweils 48 Prozent.

Der Github-Filter scheint unter Gender-Gesichtspunkten fair zu sein. Das ist aber nicht immer der Fall. Ein anderes Beispiel, das tatsächlich Wurzeln in der Realität hat: Eine Personalvermittlungsagentur hat einmal festgestellt, dass sich auf einer Fan-Website für japanische Manga-Comics besonders viele hervorragende (männliche) Programmierer tummeln. Wir nehmen einmal an, dass tatsächlich 90 Prozent der männlichen Nutzer dieser Website Softwareentwickler sind. Die weiblichen User – von denen es genauso viele gibt – gehen diesem Beruf jedoch nur zu 10 Prozent nach. Die übrigen besuchen die Seite, weil sie von den Comic-Zeichnungen fasziniert sind.

Wenn wir nun über Cookies unsere Anzeige nur denjenigen zeigen, die schon einmal im Manga-Forum waren, ergibt sich ein anderes Bild:

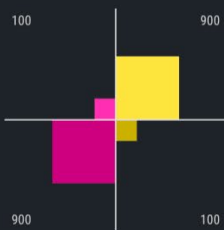


Manga

2.000  
Personen gezeigt

198.000  
Personen nicht gezeigt

ANZEIGE GEZEIGT



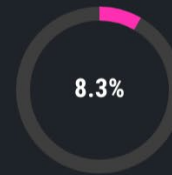
PRÄZISION

Wie viele von denen, die die Anzeige gesehen haben, sind Programmiererrinnen und Programmierer?



RICHTIG-POSITIV-RATEN

Wie groß ist die Chance einer Programmiererrin / eines Programmierers, die Anzeige zu sehen?



Diese Auswahl ist unfair: Während 18 Prozent der Programmierer unter den Besuchern der Social-Media-Seite die Anzeige sehen, sind es nur 8 Prozent der Programmiererrinnen. Man muss sich also nicht wundern, wenn sich überproportional viele männliche Kandidaten auf die Stelle bewerben!

Man kann auch ein umgekehrtes Beispiel konstruieren: Die Website »Girls Who Code« will dazu beitragen, dass sich mehr Mädchen und junge Frauen für Informatik interessieren. Sie wird von vielen Informatikern beiderlei Geschlechts besucht – aber natürlich vorrangig von weiblichen. So sehen die Zahlen aus, wenn die Anzeige nur Menschen gezeigt wird, die die »Girls Who Code«-Website besucht haben:



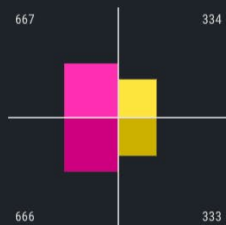
Girls Who Code



531.334  
Personen nicht gezeigt

2.000  
Personen gezeigt

ANZEIGE GEZEIGT



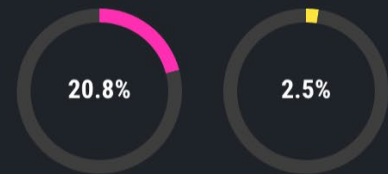
PRÄZISION

Wie viele von denen, die die Anzeige gesehen haben, sind Programmierern und Programmierer?



RICHTIG-POSITIV-RATEN

Wie groß ist die Chance einer Programmiererin / eines Programmierers, die Anzeige zu sehen?



Nun haben die männlichen Programmierer eine schlechtere Chance, die Anzeige zu sehen – ein klarer Fall von Männerdiskriminierung.

Vielleicht lässt sich die Unfairness beseitigen, wenn man mehrere Kriterien auswählt und die Anzeige jenen zeigt, die die eine oder die andere Bedingung erfüllen? Online können Sie mit der Grafik spielen und eines oder mehrere der eben vorgestellten Auswahlkriterien ankreuzen. Bekommen Sie eine Auswahl zu Stande, die einigermaßen fair ist?

Wie sich herausstellt, es ist gar nicht so einfach, den Algorithmus so zuzuschneiden, dass er fair ist und trotzdem eine hohe Präzision hat, also viele Menschen in der anvisierten Zielgruppe erreicht.

Und dabei hatten wir es mit einem vereinfachten Problem zu tun: Wir kannten bei diesem Experiment alle relevanten Größen, insbesondere wie sich die Geschlechter bei den unterschiedlichen Filtern verteilen. In der Realität kennt man diese Zahlen in den meisten Fällen nicht. Man ist auf Vermutungen angewiesen oder kann allenfalls im Nachhinein versuchen, die Fairness der getroffenen Wahl einzuschätzen.

**Frei oder hinter Gittern?**

Die Frage, ob jemand eine Stellenanzeige zu sehen bekommt oder nicht, ist wahrscheinlich nicht so lebenswichtig, dass sich viele Menschen über Ungleichheiten aufregen würden. Das nächste Beispiel hat in den USA aber heftige Diskussionen ausgelöst. Hier geht es darum, ob ein Tatverdächtiger nach einem Verbrechen in Untersuchungshaft sitzen muss, weil die Gefahr besteht, dass er weitere Verbrechen verüben könnte, oder ob er, im Zweifelsfall gegen Kautions, erst einmal auf freien Fuß kommt. Ein Algorithmus sollte US-Richterinnen und -Richter bei dieser Entscheidung unterstützen. Er hat allerdings eine Diskussion darüber ins Rollen gebracht, ob Afroamerikaner auf Grund ihrer Hautfarbe auch im Rechtssystem systematisch benachteiligt werden.

Über den Straftäter-Algorithmus wissen wir nicht viel. Er ist das Firmengeheimnis eines IT-Anbieters. Das Programm gibt jeder verdächtigen Person, die gefasst wird, einen »Risiko-Score«, eine ganze Zahl zwischen 1 und 10, die die Gefahr eines Rückfalls beziffern soll – genauer gesagt: die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Mensch in Zukunft erneut ein Verbrechen begehen wird. Je höher der Wert, desto größer das Risiko. Man stellt einen Schwellenwert ein – wer mindestens diesen Risiko-Score hat, bleibt in Untersuchungshaft, wer darunterliegt, darf bis zur Verhandlung frei sein.

Angenommen, der Score schätzt die Gefährlichkeit der Täter einigermaßen realistisch ein (dazu später mehr). Wenn wir über Hautfarbe reden und nur Schwarze und Weiße betrachten: Was würden Sie in dieser Situation als fair empfinden?

1. Der Anteil derjenigen, die in Haft bleiben müssen, soll für Schwarze und Weiße gleich groß sein. (Parität)
2. Die Entscheidung »Haft – ja oder nein« wird unabhängig von der Hautfarbe getroffen – wessen Risiko über dem Schwellenwert liegt, bleibt in Haft. (Farbenblindheit)
3. Die Chance, ungerechtfertigt in Haft zu bleiben, obwohl sie kein Verbrechen begehen würden, soll für Schwarze und Weiße gleich sein. (Chancengleichheit)
4. Ich weigere mich, solch eine Entscheidung auf Grund von Zahlenwerten zu treffen – ein Richter sollte bei seiner Entscheidung verschiedene Faktoren miteinbeziehen, unter anderem auch die Persönlichkeit und das Verhalten der Angeklagten.

Sind die ersten drei Fairnesskriterien überhaupt unterschiedlich? Lassen sie sich alle erfüllen? Und wenn man die Entscheidung dem subjektiven Ermessen eines Menschen überlässt: Ist das wirklich fairer? Oder sind die Angeklagten dann lediglich den Vorurteilen und der Willkür dieser Person ausgeliefert? Zumindest die mathematischen Unterschiede zwischen den drei Fairnesskriterien werden wir im Folgenden untersuchen.

### Ist der Algorithmus gut kalibriert?

Der Algorithmus, der den Tatverdächtigen einen Risikowert zuweist, beruht auf etwa 130 Faktoren, Hautfarbe und Geschlecht gehören nicht dazu. Alle weiteren Details sind aber das Geheimnis der Firma, die das Verfahren entwickelt hat.

Beschreibt der Algorithmus das Rückfallrisiko angemessen?

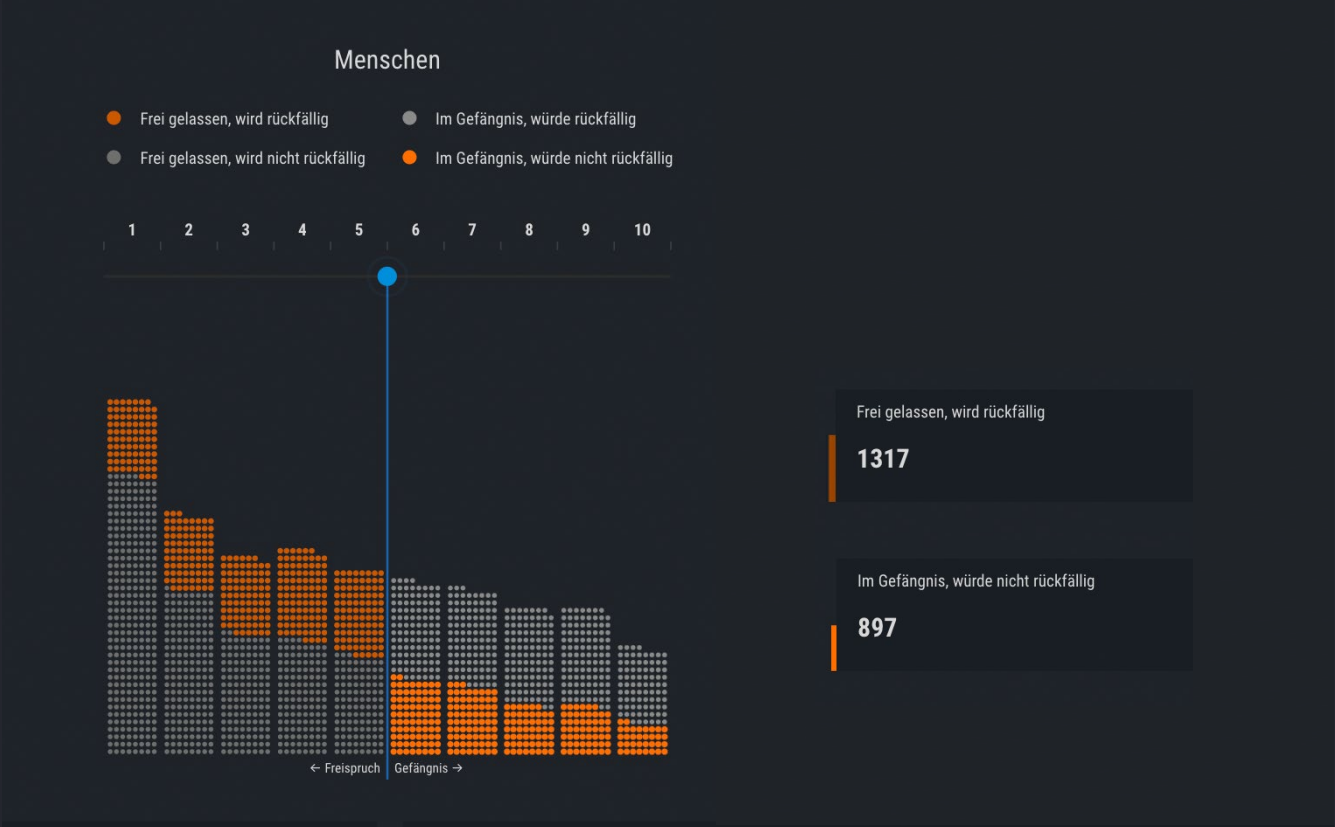
Schauen wir uns erst einmal an, wie viele Personen tatsächlich nach der Haft innerhalb von zwei Jahren rückfällig werden. Die folgende Grafik fasst die Ergebnisse einer 2016 veröffentlichten Statistik des Non-Profit-Newsdesk ProPublica zusammen und zeigt, dass die Rückfallquote etwa linear mit der Risikoklasse ansteigt, die vom Algorithmus ausgegeben wird. In Klasse 1 beträgt sie 21 Prozent, in Klasse 10 werden 71 Prozent rückfällig.





Der Algorithmus scheint das Risiko also einigermaßen adäquat zu beschreiben, zumindest wenn man die Gesamtstatistik betrachtet.

Die Strafverfolger müssen nun entscheiden, wo sie die Grenze ansetzen: Ab welcher Risikoklasse müssen die Angeklagten in Haft bleiben? Hier können Sie zum ersten Mal Schicksal spielen: Natürlich bedeutet ein niedriger **Schwellenwert** mehr Sicherheit, es werden **weniger Verbrechen** begangen. Gleichzeitig werden jedoch auch viele Menschen, die kein Verbrechen begangen hätten, in Haft gehalten. Wo würden Sie die Grenze ziehen? Probieren Sie es online aus!

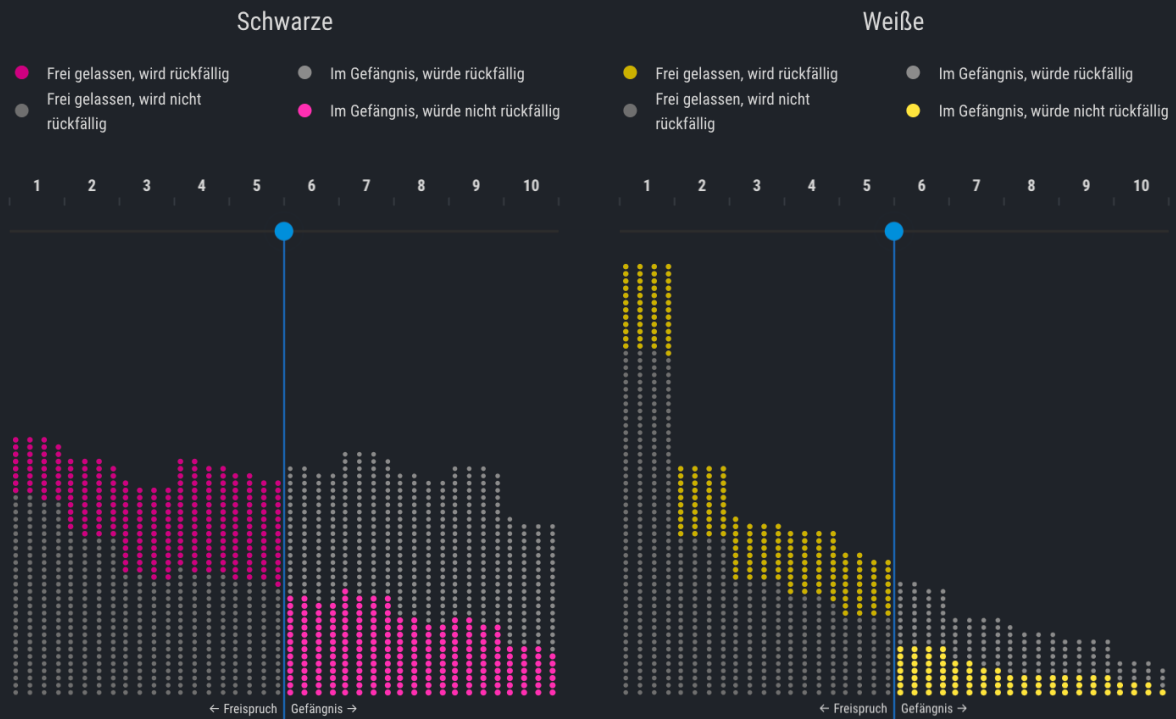


**Werden Menschen unterschiedlicher Hautfarbe gleich behandelt?**

Dass der Algorithmus über die Gesamtheit der Gefangenen das Risiko ungefähr richtig einschätzt, bedeutet noch lange nicht, dass er auch Menschen unterschiedlicher Hautfarbe gleich behandelt.

**Parität**

Wenn Sie in der Umfrage oben »Parität« als Fairnesskriterium gewählt haben (also den gleichen Anteil von Verurteilten), dann ist der Algorithmus unfair. Egal wie Sie den Schwellenwert ansetzen – es landet stets ein größerer Anteil Afroamerikaner hinter Gittern.



Anteil der Schwarzen, die in Haft gehalten werden

**48.6%**

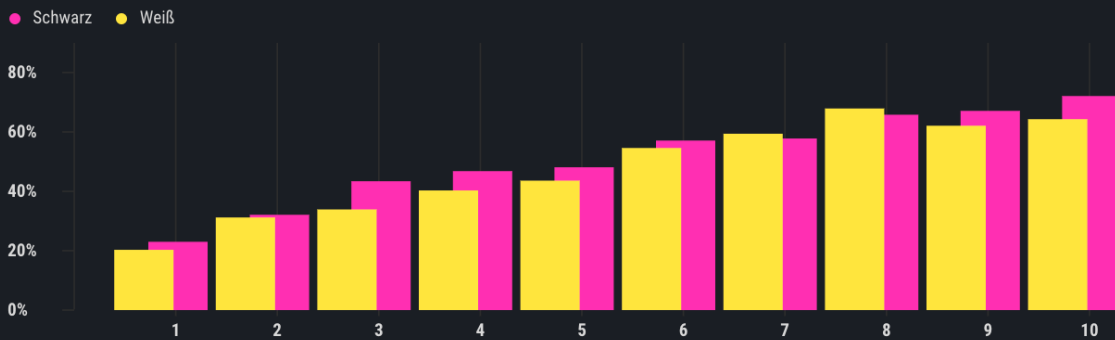
Anteil der Weißen, die in Haft gehalten werden

**23.4%**

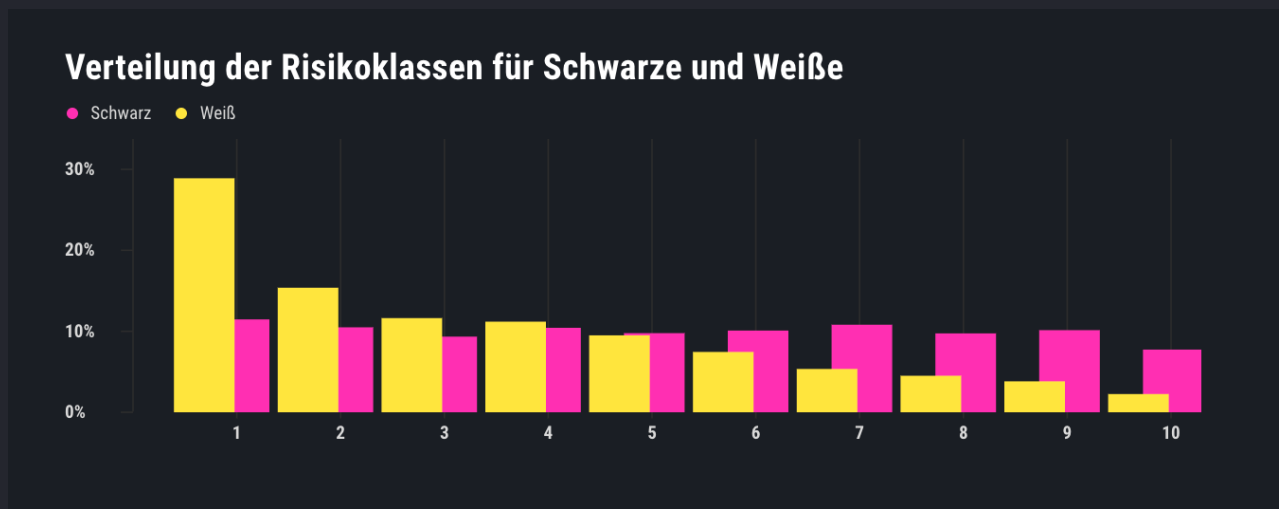
### Farbenblindheit

Die Firma, die den Algorithmus entwickelt hat, hält dem entgegen: Die Software bezieht das Merkmal Hautfarbe gar nicht mit ein. Das Ergebnis kommt dadurch zu Stande, dass Schwarze im Durchschnitt häufiger rückfällig werden. Schaut man hingegen auf die Zahl der Rückfälligen nach Risikoklasse, so ist der Wert bei Schwarzen und Weißen ungefähr gleich.

### Rückfallquote nach Hautfarbe und Risikoklasse



Wie kommt dann die (tatsächliche oder scheinbare) Ungerechtigkeit zu Stande? Es liegt daran, dass Weiße und Schwarze Personen nicht gleich auf die Risikoklassen verteilt sind.

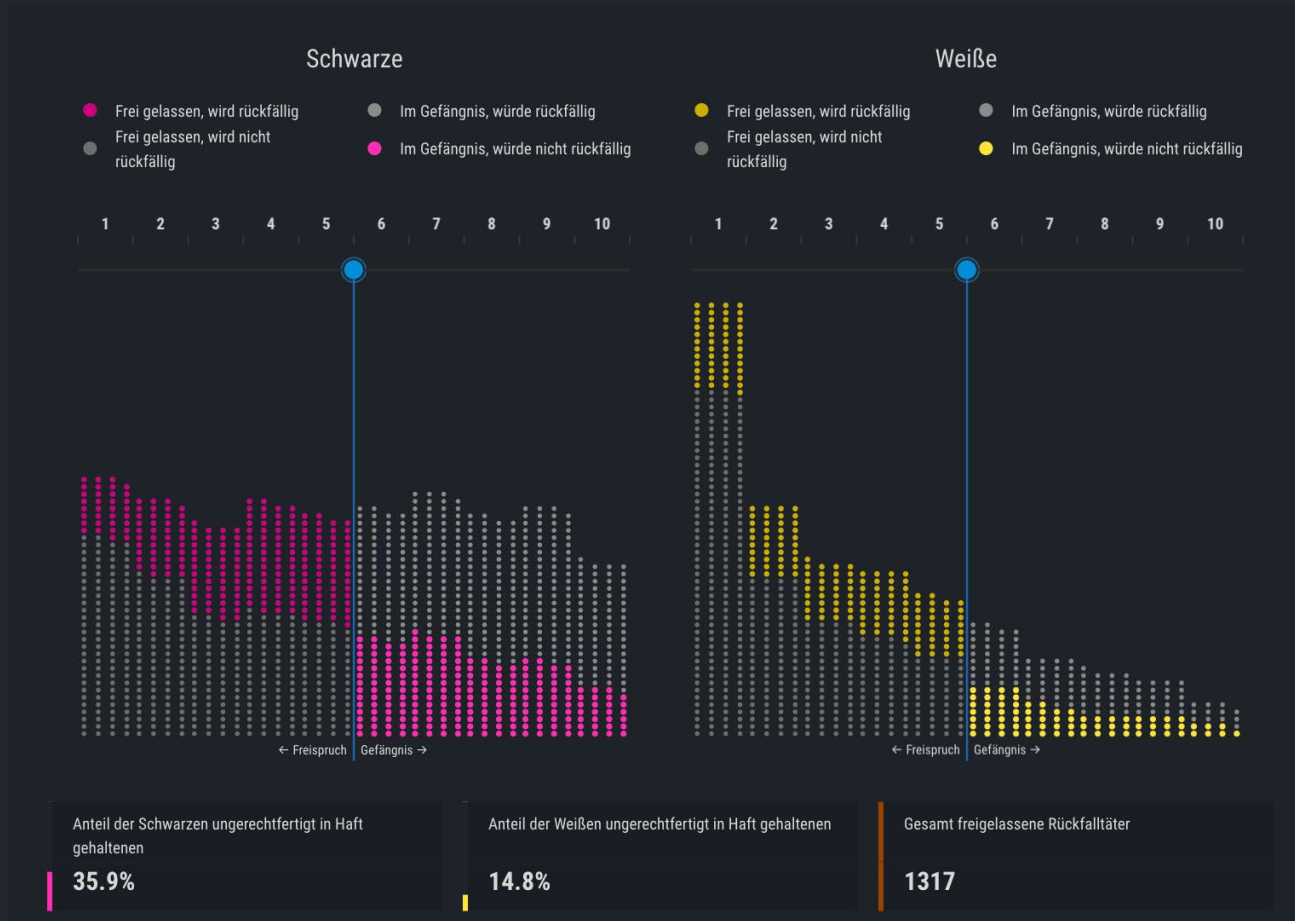


Es ist mathematisch beweisbar, dass bei einer solchen Verteilung die Fairnesskriterien »Parität« und »Farbenblindheit« nicht beide gleichzeitig erfüllbar sind. Man muss sich für eines der beiden entscheiden.

### Chancengleichheit

Kritiker könnten einwenden: Den Schaden haben bei diesem System diejenigen, die im Gefängnis gehalten werden, obwohl sie gar kein neues Verbrechen begangen hätten. Und deren Anteil ist bei den Schwarzen größer als bei den Weißen.

Gleichzeitig werden unter Weißen Menschen mehr Straftäter frei gelassen, die trotzdem wieder Verbrechen begehen.



Es stellt sich also die Frage, wie groß die Chance für einen Nichtwiederholungstäter ist, ungerechtfertigt in Haft zu bleiben? Und wie groß ist die Chance, dass ein Wiederholungstäter frei gelassen wird und weitere Straftaten begeht?

### Die Simulationsmaschine

Jetzt können Sie online Schicksal spielen: Wir entkoppeln die beiden Schieberegler, Sie können den Schwellenwert für Schwarze und Weiße unabhängig voneinander festlegen. Die Konsequenzen werden Ihnen direkt angezeigt: der Anteil der ungerechtfertigt gefangenen Gehaltene und der Anteil der Rückfälligen, die frei gelassen wurden. Finden Sie eine Einstellung der beiden Regler, die zu einem Ergebnis führt, das Sie fair finden?

Das Experiment zeigt, dass es unmöglich ist, verschiedene Fairnesskriterien unter einen Hut zu bekommen. Insbesondere muss sich jede Einstellung, die unterschiedliche Risikoschwellen für Menschen verschiedener Hautfarben festlegt, vorwerfen lassen, dass sie vielleicht für eine höhere »Gruppenfairness« sorgt, aber Individuen unterschiedlich (und damit unfair) behandelt. Wenn für Schwarze der Risiko-Schwellenwert höher angesetzt wird, kann das zu mehr Verbrechen in mehrheitlich von Schwarzen Menschen bewohnten Stadtvierteln führen.

Vor allem zwei Kritikpunkte haben dazu geführt, dass das algorithmische Entscheidungssystem wieder abgeschafft wurde: Erstens war die Software intransparent, die Firma hat ihre Kriterien nicht offengelegt. Und zweitens verhindert eine Fokussierung auf numerische Risikowerte die Diskussion darüber, warum die Rückfallquote bei bestimmten Bevölkerungsgruppen größer ist. Statt Menschen vorsorglich hinter Gitter zu bringen, könnte man auch darüber nachdenken, welche Hilfen man ihnen anbietet, damit sie eben nicht im ewigen Kreislauf von Verbrechen und Gefängnis stecken bleiben.

### »Geschlechtsblind« ist nicht immer gut

Man vermeidet Diskriminierung am besten, indem man die entsprechende Eigenschaft außer Acht lässt – das ist ein Prinzip, das in vielen Gesetzen verankert ist. Wenn man blind gegenüber dem Geschlecht oder der Hautfarbe von Menschen ist, dann kann man sie deswegen auch nicht benachteiligen.

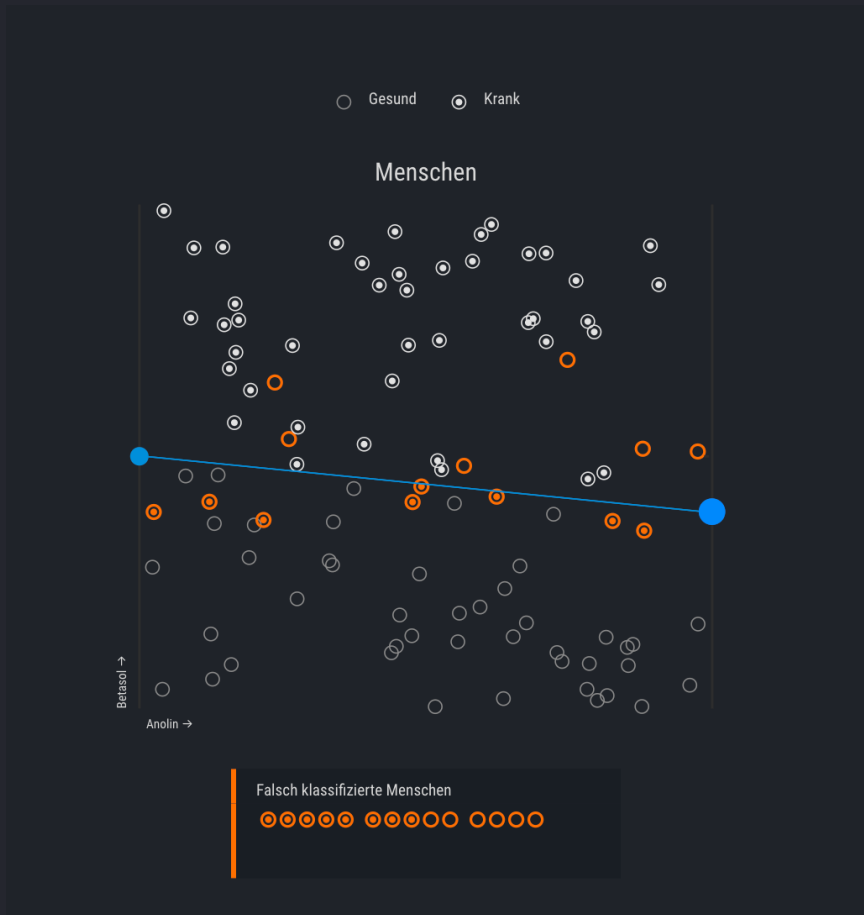
Aber dieses Prinzip funktioniert nicht immer. Zum Beispiel kann es sein, dass das geschützte Merkmal in anderen Variablen verankert ist, die man bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Manchmal gibt es jedoch tatsächlich Unterschiede, die man berücksichtigen muss, wenn man fair sein will. Zum Beispiel haben Frauen mitunter Lücken im Lebenslauf, weil sie Kinder bekommen haben. Ihnen das bei der Jobsuche negativ anzurechnen, wäre unfair.

Die »Geschlechtsblindheit« kann auch wichtige Zusammenhänge verschleiern. Das soll das folgende – wieder rein hypothetische – Beispiel zeigen, das auf die Informatikerin Katharina Zweig von der TU Kaiserslautern zurückgeht.

Fachleute sind auf der Suche nach einem Mittel gegen die seltene (fiktive) Krankheit Fantositis. Sie vermuten einen Zusammenhang zwischen diesem Leiden und dem Spiegel der beiden (ebenfalls fiktiven) Hormone Anolin und Betasol, die sich offenbar gegenseitig beeinflussen. Wenn wir den genauen Zusammenhang kennen, kann die Krankheit frühzeitig erkannt und behandelt werden.

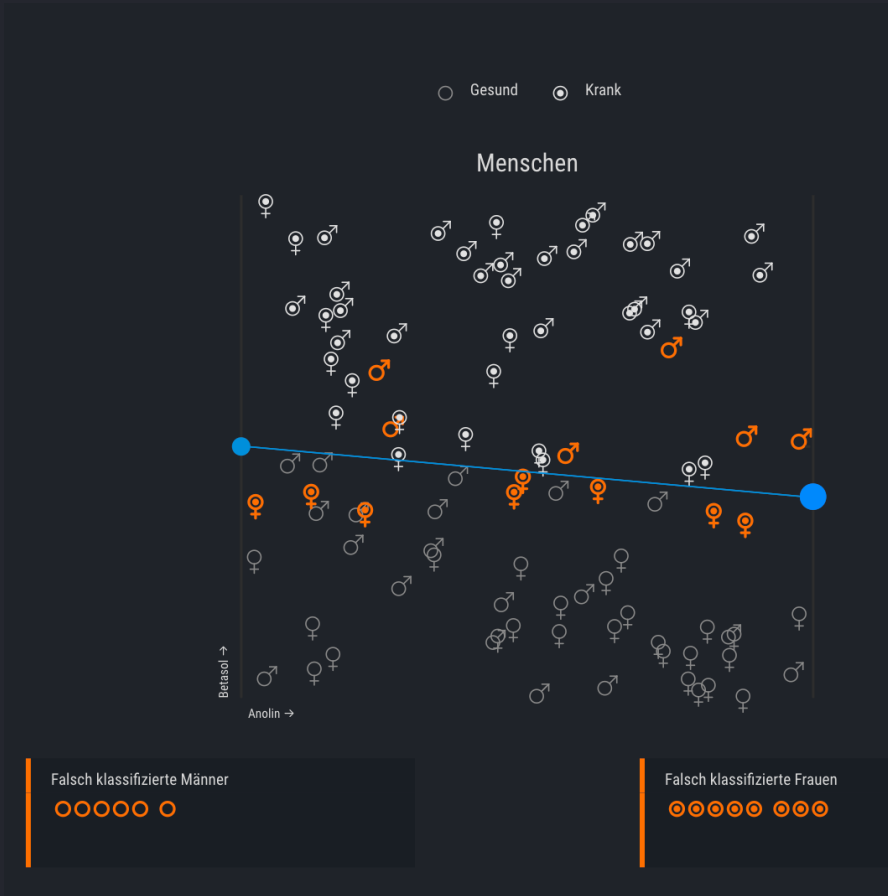
Wir messen die Hormonspiegel bei 100 Personen, 50 gesunden und 50 kranken. Von denen sind jeweils die eine Hälfte Männer, die andere Frauen.

Sie sind jetzt die künstliche Intelligenz. Sie bekommen die Daten ohne Angabe des Geschlechts der Patienten. Ihre Aufgabe: Sie sollen den mathematischen Zusammenhang zwischen den Hormonen feststellen. Die Gerade in dem Bild hat an den Rändern zwei »Anfasser« – online können Sie versuchen, diese so zurecht zu ziehen, dass die Gesamtfläche in einen »gesunden« und einen »kranken« Bereich aufgeteilt wird, mit möglichst wenigen falsch klassifizierten Personen. Zum Beispiel:



Wie viele Menschen hat Ihre Gerade falsch klassifiziert? Es gibt keine Gerade, die eine perfekte Trennung ermöglicht. Wenn bei Ihnen 11 Menschen auf der falschen Seite waren, haben Sie es gut gemacht!

Bisher waren wir geschlechtsblind. Nun schauen wir hin, welches Geschlecht die Personen haben. Fällt Ihnen etwas auf?



Genau: Die nicht erfassten Risikoträger sind alle Frauen, die falsch positiv diagnostizierten alle Männer!  
Wie kann das sein?

Die Antwort: Die Hormone haben bei Frauen andere Auswirkungen als bei Männern. Im nächsten Schritt können Sie die Linie jeweils für Männer und für Frauen separat ziehen.



Das ist tatsächlich möglich. Die Linie für Männer verläuft höher als die von Frauen, weil die Hormone bei Männern anders zusammenwirken als bei Frauen. Das muss bei der Diagnose und gegebenenfalls auch bei der Therapie berücksichtigt werden.

Die getrennte Betrachtung von Männern und Frauen hat also nicht nur eine neue Erkenntnis gebracht, sondern kann auch zu einer faireren (das heißt hier: auf die Person abgestimmten) Behandlung geführt.

Die Beispiele zeigen, dass es extrem schwierig ist, gerechte Entscheidungen zu treffen, selbst wenn man die besten Absichten hat. Was ist fairer – der Mensch, der seine Entscheidungen auf Grund von Erfahrung, allerdings auch von Vorurteilen und subjektiven Emotionen trifft? Oder der Algorithmus, der scheinbar objektiv ist, aber allerlei eingebaute Ungerechtigkeiten aufweisen kann? Wie wir gesehen haben, ist es manchmal mathematisch unmöglich, unterschiedliche Fairness-Vorstellungen miteinander zu vereinbaren. Und so muss man von Fall zu Fall definieren, was man in der jeweiligen Situation als fair empfindet. Und das ist eine Frage, die uns keine Maschine abnehmen kann. ◀

Dieser Artikel wurde im MIP.Labor entwickelt. Das MIP.Labor ist eine Ideenwerkstatt für Wissenschaftsjournalismus, angesiedelt an der Freien Universität Berlin und gefördert von der Klaus Tschira Stiftung. Stipendiatinnen und Stipendiaten entwickeln neue Medienformate zu Themen aus Mathematik, Informatik und Physik.

CC-BY-SA 4.0



STOLTING / UNITED ARCHIVES / VISUALS / PICTURE ALLIANCE



Science Busters

## Wissenschaft ist das, was auch dann gilt, wenn man nicht dran glaubt

Verlag: Hanser, München  
2022

€ 27,-

## Wissenschaft schmackhaft serviert

Das Wissensmenü: Vorspeise, Hauptgang, Dessert und Geplapper zum Schluss.

► Wenn Sie im Regen stehen, dann »halten Sie doch mal Ausschau nach Sternenrotz. Oder Teufelsdreck, Hexenkaas oder Zauberbutter«. Hört sich gefährlich an, ist aber tatsächlich harmlos und alles dasselbe, nämlich Bakterien, die durch Regen zu einer glibberigen Masse aufquellen, schreiben die Science Busters. Paracelsus hätte diese Masse für Ausscheidungen von Sternen gehalten, daher einer der Namen. Das ist aus astronomischer Sicht allerdings falsch, erklären die Autoren und Autorinnen und erzählen die Geschichte trotzdem, denn sie sei so schön geeignet für Small Talk.

Die ScienceBusters bestehen inzwischen aus drei Wissenschaftlerinnen, sechs Wissenschaftlern und einem Windhund, die auf witzige Art Wissen vermitteln und zu ihrem

15-jährigen Bestehen das Buch geschrieben haben. Die Science-Busters treten regelmäßig in Bühnenshows auf, wo sie dann nicht nur Wissen in witzigen Portionen verteilen. Sie servieren nach ihrer Show für das Publikum »kosmische Cocktails, Schweinsbraten, Glühendl« oder »Laugenstangerl gebackten und Eisbockbier kalt destilliert«. Zu Beginn hätten sie sich noch als »die schärfste Science Boygroup der Milchstraße« bezeichnet, aber da waren sie nur »Frontmen«. Jetzt wo auch »Frontwomen« dazugekommen sind, passe wohl »die Kelly Family der Naturwissenschaften« besser. Doch Spitzname hin oder her, die Science Busters zeigen, dass sie sich nicht ganz so wichtig nehmen – die Wissenschaft allerdings schon.



Sie wollen aber nicht nur witzig sein, sie wollen Wissenschaft vermitteln – mit vielen Mitteln. Denn wer nichts weiß, muss alles glauben, so die Autoren. Beweist das Thema Elektrosmog. Sie meinen, die bisherige Wissenschaftskommunikation habe gezeigt, nur zu versuchen, etwas einfach zu erklären, führe eben nicht immer zum Erfolg. Und sie beweisen, dass ihre Art der Kommunikation nicht nur auf der Bühne klappt, sondern auch als geschriebener Text. Sie erzählen, was Nonnen mit der Verbreitung von Feigwarzen zu tun haben, warum Asteroiden immer in Kratern landen, von dunkler Energie, der Fusionsenergie, von »fuzrtrockenen Archeotypen« an heißen Quellen in der Tiefsee, wie eine Blockchain funktioniert, Wissenswertes rund um das Thema Holz oder warum man bestimmte Brennesseln nur mit Schweißserhandschuhen anfassen sollte.

Sie lassen auch die schlechten Themen nicht aus, wie Klimakrise, Pandemien, Weltuntergänge und den Streit um Impfungen. Aber sie tun das immer mit einem Schmunzeln und so viel Spaß, dass man doch noch einmal gerne davon liest. Eine

von den guten Nachrichten der ScienceBusters: Der Weltuntergang durch Einschlag eines Asteroiden wird wohl ausbleiben. Wobei sie am Ende des Buches den endgültigen Weltuntergang schon schildern. Aber bis die Sonne und alles andere untergehen, ist es ja noch einige Milliarden Jahre hin.

Die einzelnen Kapitel sind wie ein Menü aufgebaut. Insgesamt kommen 16 Themen zu den 15 Jahren Science Busters von 2007 bis 2022 zusammen, jeweils angeordnet nach den Jahren. Als Erstes stehen im jeweiligen Kapitel Kurznachrichten, die irgendwie – manchmal weit hergeholt – mit dem Inhalt des Hauptganges zu tun haben oder aus dem Jahr der Kapitelüberschrift stammen. Beim Kapitel »Das Jahr 2018 | Ich und mein Holz« sind es drei kurze Meldungen: zum Tod von Hawking, zum Fund von ziemlich alten Fingerknochen einer Frau mit Neandertaler-Mutter und Denisovaner-Vater und zum Tod von Ingvar Kamrad, dem Gründer von Ikea.

Mal passen diese Art Appetizer mehr oder weniger zum Hauptteil, aber sie sind kurz, knapp und machen Appetit auf mehr. In dem

Hauptteil schaffen sie es auch, Themen wie Kryptowährung, Fusionsenergie oder Schwarze Löcher jeweils auf wirklich verständliche Weise zu erklären und zugleich auf sehr witzige Weise. Der Kracher ist dann das Dessert: Wissen zum Angeben auf Partys, die »Small-Talk-Hilfe«. Da geht es – immer wissenschaftlich nachgewiesen – in aller Kürze darum, ob man sich von Furzen mit Corona anstecken kann, wie viel Urin so im Schwimmbaden herum-schwappt, warum Hundekot im Wald kein guter Mist ist, warum Bienen auf Koffein stehen oder wie man es schafft, Asteroiden einen Namen zu geben. Zum Schluss folgt am Ende jedes Kapitels, was bei den Science-Busters selber alles so in dem Jahr passiert ist. Man kann sich also aussuchen, was man vom Menü nascht. Auf das Dessert wird allerdings sicher kaum einer verzichten wollen.

**Katja Maria Engel** ist promovierte Materialforscherin und Wissenschaftsjournalistin in Dülmen.

## Die Evolution von Viren und die Pandemien

Ein detailreiches Sachbuch zum Thema Pandemie – von früheren Seuchen bis zur aktuellen Diskussion über den Schutz der Artenvielfalt.

Das lesenswerte Buch des Evolutionsbiologen Matthias Glaubrecht beschreibt die biologischen Grundlagen von Pandemien, die Suche nach dem Ursprung des Virus, das die derzeitige Corona-Pandemie ausgelöst hat, sowie die Ausbreitung von Seuchen, die die Menschheit seit 430 vor Christus immer wieder heimgesucht haben. Der etwas ungewöhnliche Titel spielt auf die Überschrift eines Zeitungsartikels an: Pangoline sind Schuppentiere, deren Rolle als

Zwischenwirt für Corona-Viren diskutiert wurde. Dabei ist die Überschrift eigentlich unnötig vermenschlichend, denn es handelt sich hier nicht um einen Krimi, sondern um ein Sachbuch – das Pangolin hatte sicher keine »Rache« im Sinn!

Das Werk besteht aus drei großen Teilen, die sich mit der Suche nach dem Ursprung der Corona-Pandemie, der Ausbreitung früherer Epidemien und einem Ausblick über unsere Handlungsmöglichkeiten beschäfti-



Matthias Glaubrecht

### Die Rache des Pangolin

Verlag: Ullstein Buchverlage GmbH

€ 24,99

gen. Dem umfangreichen Text von 536 Seiten folgen ein Glossar, eine Chronologie der wichtigsten Seuchen, ausführliche Anmerkungen zum Text sowie ein Literatur- und Stichwortverzeichnis. So haben die Leserinnen und Leser die Möglichkeit, sich über Details zu informieren, und erhalten einen Überblick über die relevante aktuelle wissenschaftliche Literatur.

Woher die Seuche kommt, ist nicht so einfach zu beantworten, wie es auf den ersten Blick scheint. Corona-Viren existieren schon seit Längerem und waren immer wieder Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Glaubrecht beschreibt, wie Viren in verschiedenen Tierarten nachgewiesen wurden, etwa in Fledermäusen oder anderen Wildtieren. Der Sprung der Erreger vom Tier zum Menschen wird als Zoonose bezeichnet – sich auf eine einzige Ursache solcher Ansteckungen zu konzentrieren, erscheint jedoch nicht sinnvoll: Bereits zu Beginn der Corona-Pandemie gab es drei genetisch unterschiedliche Virenstränge. Und Viren verändern

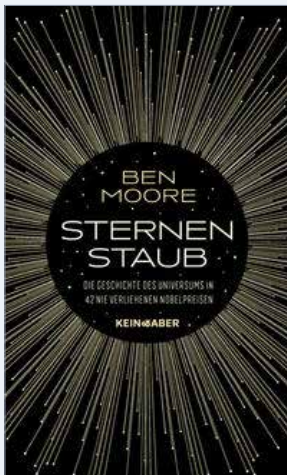
sich weiter, gemäß dem bekannten evolutionsbiologischen Ziel, vorteilhafte genetische Eigenschaften in einer Population zu verbreiten. Dass die Pandemiebekämpfung so schwierig ist, liegt auch daran, dass Informationen aus der Wissenschaft oft lange ignoriert werden, denn wie der Autor schreibt, ist »das Virus ... dem Verhalten der Menschen stets einen Schritt voraus, der Umsetzung von Wissen durch die Politik sogar um Längen«. Die Darstellung der Verbreitung der Corona-Viren ist detailreich und spricht auch die Frage nach einem Laborunfall in Wuhan an. Dieser scheint Glaubrecht recht unwahrscheinlich zu sein, denn »durch Labormanipulation von Viren ist noch zu keiner Zeit jemals eine Pandemie ausgelöst worden«.

Der zweite Teil des Buchs zeigt, dass sich in der Geschichte der Menschheit schon immer Seuchen verbreitet haben. Viren und Bakterien sind die ältesten Bekannten des Menschen und haben sich mit ihm gemeinsam entwickelt. Tödliche Krankheiten wie die Masern, Pest, Ebola, AIDS oder die Grippe kommen

seit Hunderten von Jahren vor. Der Mensch ist Teil der Natur – so überrascht es wenig, dass Erreger immer wieder den Sprung vom Tier zum Menschen schaffen.

Im letzten Teil illustriert der Autor, warum Pandemien in der modernen Welt häufig auftreten. Grund hierfür sind durch den Menschen verursachte Probleme wie die zunehmende Vernichtung der natürlichen Lebensräume und damit der Artenvielfalt sowie die drastische Zunahme der Weltbevölkerung. Je mehr Menschen durch Viren infiziert sind, desto mehr Mutationen der Viren werden ausgelöst – ein bekannter evolutionärer Mechanismus. Ziel kann es folglich nicht sein, Pandemien dadurch zu vermeiden, dass man die Erreger ausrottet, sondern indem etwas gegen die gegenwärtige Zerstörung der Natur unternommen wird.

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



Ben Moore

## Sternenstaub

Verlag: Kein & Aber AG

€ 25,-

## Die Präger unseres Weltbildes

Der Züricher Professor für Astrophysik Ben Moore stellt 42 bedeutende Astronomen vor und gibt interessante Denkanstöße.

► Forschung wird von Menschen gemacht. Es ist also naheliegend, die Geschichte einer Wissenschaftsdisziplin anhand der Beiträge einzelner Forscher zu erzählen. Ben Moore hat dazu 42 Personen ausgewählt, die wesentlich zum Verständnis des Kosmos beigetragen haben. Auf jeweils rund acht Seiten stellt der Autor die Persönlichkeiten vor, skizziert ihren Lebensweg und erläutert natürlich den jeweiligen Forschungsbeitrag. Herausgekommen ist ein sehr schönes, gut lesbares, unterhaltendes und informatives Buch.

Moore's Geschichte des Universums beginnt mit Eratosthenes (ca. 276–194 v. Chr., erste Messung des Umfangs der Erde) und Aristarchos von Samos (ca. 310–230 v. Chr., erste Berechnungen, wie weit Mond und Sonne entfernt sind). Dann springt Moore ins 16. Jahrhundert, in dem Nikolaus Kopernikus (1473–1543), Johannes Kepler (1571–1630) und Galileo Galilei (1564–1642) unsere Weltansicht revolutionierten. Im 17. Jahrhundert entdeckt Isaac Newton (1642–1726) die universelle Gravitation, knapp 100 Jahre später spekuliert

Immanuel Kant (1724–1804) über den Ursprung des Sonnensystems, und Friedrich Bessel (1784–1846) misst als Erster den Abstand zu den Fixsternen. So weit alles erst einmal keine Überraschungen.

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts hat sich dann die astronomische Forschung dramatisch beschleunigt. Galaxien, die voranschreitende Ausdehnung des Weltalls, die Nukleosynthese, Dunkle Materie, die kosmische Hintergrundstrahlung, Exoplaneten, Neutronensterne und Schwarze Löcher waren zu der Zeit unbekannt, als Albert Einstein (1879–1955) die Relativitätstheorie schuf. Heute sind sie allesamt Teil der Standardlehrwerke. Und entsprechend leicht fällt es, prominente Himmelsforscher des 20. Jahrhunderts zu benennen. Dadurch, dass sich Moore auf nicht vergebene Nobelpreise beschränkt, fehlen gerade bei den modernen Themen aber doch einige Wissensdurchbrüche, die eigentlich gut ins Konzept gepasst hätten: der direkte Nachweis von Gravitationswellen (2017), die Entdeckung von Exoplaneten (2019)

oder Schwarze Löcher (2020) etwa. Dagegen kann Moore aber zum Glück Einstein und die Relativitätstheorie aufnehmen, da der ikonische Forscher den Nobelpreis 1921 für seine Beiträge zur Quantenmechanik bekommen hat. Ohne dieses Kuriosum wäre Moores Buch vermutlich nicht möglich gewesen, denn zu groß wäre die Lücke in der Geschichte des Universums.

Natürlich schummelt der Autor ein bisschen mit seinem reißerischen Untertitel. Denn Nobelpreise werden erst seit 1901 vergeben, so dass allein deswegen ein Viertel der vorgestellten Personen nicht bedacht wurde. Außerdem wurde der erste Nobelpreis zu einem kosmologischen Thema erst 1974 vergeben, davor schien die schwedische Akademie der Wissenschaften die Astronomie ausgeklammert zu haben. Dadurch fehlen nicht allzu viele Namen in Moores Buch – in gerade einmal zehn Jahren gab es nämlich Nobelpreise für astronomische Themen.

Jocelyn Bell (geb. 1943) darf in diesem Buch natürlich nicht fehlen –

sie entdeckte den ersten Pulsar, wurde aber bei der Vergabe des Preises übergangen. Aber auch Moore übergeht einige Forscher, etwa Edwin Hubble (1889–1953); vielleicht am erstaunlichsten ist die Auslassung der berühmten Vorhersage des Planeten Neptun durch Urbain Leverrier (1811–1877), die umgehend durch Johann Galle (1812–1910) bestätigt wurde.

Aber aus der Diskussion in den beiden letzten Abschnitten sieht man schon: Der markante Untertitel erfüllt seinen Zweck, denn beim Lesen fragt man sich unweigerlich immer wieder: Wäre dieses Thema wirklich einen Nobelpreis wert gewesen? Und so bringt Ben Moore die Leser dazu, sich selbst eine Meinung zu bilden: Welche Menschen waren es, die unser Weltbild am meisten geprägt haben? Eine spannende Frage, eine anregende Lektüre.

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

## Clevere Sprechvögel

Raben faszinieren durch ihre Intelligenz. Dieses Buch gibt einen Einblick in die aktuelle Forschung und animiert dabei zu eigenen Beobachtungen.

► Wer ein Pferd wiehern hört, könnte sich täuschen. Vielleicht ist es ein Rabe, der neben einer Koppel nistete und die Laute von Pferden in seine Vogelsprache aufgenommen hat. Auch hinter dem Quaken eines Frosches könnte ein Rabe stecken. Selbst beim »Plopp« eines Tennisballs. Raben sind in der Lage, täuschend echt Laute aus ihrer Umwelt zu imitieren. Eigentlich gehören sie zu den Singvögeln, doch wer ihre Rufe im Ohr hat, etwa das raue »rap« oder »haa! – haa! – haa!«, der stimmt sicher zu, dass die Bezeichnung »Sprechvögel« passender wäre.

Der Verhaltensbiologe Thomas Bugnyar stellt in seinem Buch »Raben« den aktuellen Stand der Forschung dar, vor allem seine eigene, die er unter anderem an der von Nobelpreisträger Konrad Lorenz gegründeten Forschungsstelle Grünau im österreichischen Almtal betreibt. Bugnyar ist Professor für Verhaltens- und Kognitionsbiologie an der Universität Wien und beschäftigt sich seit 25 Jahren mit den Fähigkeiten von Rabenvögeln, hauptsächlich von Kolkraben, den größten unter ihnen. Eines scheint sicher: Kein Tag mit diesen Tieren ist lang-



Thomas Bugnyar

### Raben

Verlag: Brandstätter

€ 25,-

weilig, und keine Seite des Buches über sie ist öde, denn Raben und Krähen leben in komplexen Sozialsystemen und sind beeindruckend intelligent.

Von Herbst bis Mitte Februar tüfteln die Wissenschaftler kognitionswissenschaftliche Versuche aus. Danach sind Denkaufgaben fehl am Platz, denn ab da steigt der Testosteronspiegel, dann geht es um Partnerschaft, Nestbau und Brüten. Deshalb liegt in dieser Phase der Fokus auf Untersuchungen zum Sozial- und Familienleben. Die Fragen lauten etwa: Verhalten sich die Elternvögel zueinander anders, je nachdem, ob sie viele oder wenige Junge haben? Wie wirkt sich der Nachwuchs auf die Paarbeziehung aus? Wie oft kraulen sie einander und in welchen Situationen?

Manche Antworten sind bereits gefunden, vieles ist noch offen. Das Schöne an diesem Buch ist, dass wir einen Einblick in die laufende Forschung bekommen und auch erfahren, was schiefgegangen ist. Fast ist man geneigt, selbst Rabenforschung betreiben zu wollen, zumindest die Tiere zu beobachten, zum Beispiel beim Spaziergehen wahrzunehmen, wie vorsichtig sie sind. Das kommt daher, dass sie Aas fressen, sie die Hilfe von Fuchs, Bär, Wolf oder Adler brauchen, die die Haut des Beutetiers zerreißen und den Körper öffnen, was die Raben mit ihren Singvogelschnäbeln niemals könnten. Da ist es sinnvoll, auf der Hut zu sein, denn der Beutegreifer, der das Tier erlegt hat, ist der potenziell Stärkere.

Kaum haben sie ein Fleischstück ergattert, sind sie damit beschäftigt, es in Sicherheit zu bringen, also an möglichst geheimen Stellen zu verstecken. Denn wenn ein starker Vogel wegfliegt, um seine Beute in Sicherheit zu bringen, hat ein kleiner, schwächerer die Möglichkeit, kurz selbst an ein Stück Fleisch heranzukommen. So fliegen die Raben hin und weg und brauchen ein gutes Gedächtnis, um ihre Verstecke wiederzufinden.

Im Hintergrund zu warten und abzuschätzen, wann der richtige Moment ist, die Impulskontrolle, also

das herausgerissene Fleisch trotz Appetit nicht sofort zu fressen, die nötige Gedächtnisleistung, die Verstecke wiederzufinden – all das trainiert das Gehirn. Ohne großen körperlichen Aufwand an hochwertiges Futter zu kommen, wirkt also aus evolutionärer Sicht als Selektionsdruck auf die Gehirnleistung der Tiere. Sie werden schlaue!

In anderen Situationen hilft es, als Gruppe zu agieren, zum Beispiel bietet die Gemeinschaft Schutz vor dem nachtaktiven Uhu, daher übernachten Kolkkraben in Gruppen auf Bäumen. Das räbische Sozialsystem kennt Freundschaft, Verwandtschaft, Partnerschaft und Dominanz. Das geht so weit, dass Raben sich beim Streiten anders verhalten, wenn Publikum dabei ist. Sich mit anderen auseinanderzusetzen, heißt, man muss abwägen, entscheiden, Probleme lösen. Die Hypothese lautet: Je komplexer das Sozialsystem, desto leistungsfähiger ist das Gehirn.

Gegen Ende des Buchs geht der Autor noch auf das Rabenmanagement ein, das in manchen Regionen nötig ist, wenn der Bestand zu hoch ist. Statt die Tiere abzuschießen, helfen kluge Methoden, sie davon abzuhalten, Nester seltener Vögel zu räubern: Man stellt täuschend echte Eier her und füllt sie mit Brechmittel. Die klugen Raben, die sich das gut merken, lassen diese Nester in Zukunft in Ruhe.

Nach den sehr guten Büchern über Rabenvögel von Josef Reichholf, Dieter Glandt, Bernd Heinrich und Cord Riechelmann ist auch dieses empfehlenswert. Leider fehlen Stichwortregister und Literaturangaben.

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

## Farbenfroher Pflanzenrausch

**Das »Kompodium der psychoaktiven Pflanzen« ist ein farbenprächtiger Trip in die Welt der psychoaktiven Pflanzen.**

► Alles begann mit einem Besuch des Autors Jakob Hein im Garten von Illustratorin Kat Menschik. Eigentlich wollte Hein ein »möglichst schlimmes Buch über Pflanzen« schreiben, wie im Vorspann zu lesen ist: »schreckliche Verrisse von Brennesseln« zum Beispiel. Doch damit war Menschik nicht einverstanden, »denn sie liebt die uns umgebende Natur«. Sie beschlossen, stattdessen ein Buch über Pflanzen, die die Psyche beeinflussen, zu schreiben und zu illustrieren.

Kat Menschik ist freie Illustratorin. Das aktuelle Buch gehört zu ihrer Reihe Lieblingsbücher. Der Arzt Jakob Hein arbeitet als Psychiater und hat bereits mehrere Bücher veröffentlicht.

Im aktuellen Buch legt der Autor die Definition einer psychoaktiven Pflanze nicht besonders eng aus: Er schreibt auch über Aphrodisiaka – Pflanzen, die die Liebesfähigkeit beeinflussen – und über die »Götterspeise« Kakao. Denn fast jede Pflanze könne eine psychoaktive Wirkung haben, wie er bei seiner Recherche feststellte. So musste Hein eine Auswahl aus über 500 beschriebenen psychoaktiven Pflanzen treffen: Er hat »wie ein fröhlicher Gärtner einige besonders schöne ausgewählt«, die er in neun Kapiteln vorstellt. Nicht ohne vorher zu warnen: »Ich rate vom Konsum der meisten hier erwähnten Pflanzen ab.«

Menschen haben zu allen Zeiten und auf allen Erdteilen auf jede

erdenkliche Art Pflanzen konsumiert – wenn dadurch eine psychische Wirkung eintrat, wurde der Konsum verfeinert: »Der Mensch liebt den Rausch«, so die Folgerung des Psychiaters. Und: »Sehr viele Wege führen zu einem Rausch.«

Die Kulturgeschichte der psychoaktiven Pflanzen nimmt einen Großteil des Buches ein: So erfährt der Leser nicht nur von den giftigen, medizinischen und halluzinogenen Wirkungen der Pflanzen, sondern auch, wie und wann der Mensch die Pflanzen verwendet und wie sich der Konsum verbreitet hat. So beschreibt Hein im Kapitel über das alkoholische Getränk Absinth die neurotoxische Wirkung von Thujon aus der Wermutpflanze, aber auch die Verbreitung von Absinth von Frankreich aus über die Welt – durch das französische Militär. Missbrauch führte schließlich zu Verboten – und zur Schöpfung eines neuen Getränks ohne Wermut: Pastis.

Der Leser erfährt, wie es zum Kat-Kauen in Ländern am Golf von Aden (unter anderem in Jemen) kam, während die australischen Aborigines Pituri und südamerikanische Ureinwohner Coca-Blätter kauten. »Kat ist ebenso fest in den Kulturen seiner Haupt-Konsumländer integriert wie der Alkoholkonsum in der westlichen Welt.« Apropos Alkohol: Auch für dieses Kapitel geht der Autor weit in die Geschichte zurück: Erste Hinweise auf das Bierbrauen fand man auf sumerischen Keilschrifttafeln aus Mesopotamien. Und: »Schon Affen konsumieren gern und regelmäßig alkoholische Getränke.« Die alkoholische Gärung ist »die am weitesten verbreitete Art, Pflanzen zu einer psychoaktiven Substanz zu verarbeiten«.

Ursprünglich aus Südamerika stammt die Tabakpflanze (*Nicotiana tabacum*), die dort auf fast jede erdenkliche Weise konsumiert wurde. Aus den portugiesischen Kolonien kam Tabak im 16. Jahrhundert nach

Portugal und Frankreich. Das Gift der Pflanze, Nikotin, ist »eine der wohl stärksten psychoaktiven Substanzen überhaupt« – und »hat von allen Rauschmitteln das höchste Abhängigkeitspotenzial«.

Für psychoaktive Pflanzen muss man aber nicht weit reisen: Zu finden sind sie auch im heimischen Garten (Goldlack und Dictamnus), auf der Fensterbank (Alpenveilchen und Amaryllis, eigentlich Ritterstern) und im eigenen Gewürzregal, zum Beispiel Muskatnuss, Paprika und Salbei: Dieses Kraut galt im Altertum als Allheilmittel und wird auch heute noch vielfältig eingesetzt – außer der Azteken-Salbei (*Salvia divinorum*). Da er Halluzinationen auslösen kann, fällt diese Salbei-Art seit 2008 unter das Betäubungsmittelgesetz.

Viele solche interessanten Fakten über psychoaktive Gewächse findet man in diesem Kompendium – auf den ersten Blick auffallend ist es aber

durch einen wahren Farbrausch der fast psychodelischen Zeichnungen von Kat Menschik. Die Texte werden wild und knallbunt ergänzt, illustriert und aufgewertet. Der Autor sieht sich daher auch als »Background-Sänger«, der die »Hauptattraktion« gekonnt unterstützt: die »großartige und wunderschöne Gestaltung durch die Buchkünstlerin Kat Menschik, mit der ich am Anfang im Garten saß und Kuchen aß«.

Die Illustratorin hat das Thema des Buches zum Anlass genommen, »so richtig über die Stränge zu schlagen«, wie Menschik im Interview mit dem Deutschlandfunk sagte. Die Zeichnungen wurden gedruckt mit sechs verschiedenen, einzeln angemischten Echtfarben – von Knallgelb über Giftgrün bis Neonpink –, also nicht im sonst üblichen Rasterdruck. »Das bewirkt, dass die einzelnen Farben viel, viel leuchtender sind als normal zusammengesetzte Farben«, so Menschik über das aufwendige Druckverfahren.

Die Zeichnungen sind zum Teil übereinander gelagert, die Bilder scheinen zu verschwimmen – passend zum Thema. Teilweise leidet die Lesbarkeit des Textes dadurch etwas, wenn die bunten Zeichnungen darüber liegen – aber das sei Absicht, so Menschik.

Das kleine Buch eignet sich zum Schmökern – locker führt Jakob Hein mit überraschenden Fakten durch die psychoaktive Pflanzenwelt und die Geschichte des Rausches, während man sich an den schönen farbenfrohen Zeichnungen von Kat Menschik optisch berauschen kann!

**Maren Schenk** ist Diplombiologin sowie Medizin- und Wissenschaftsjournalistin.



Kat Menschik, Jakob Hein  
**Kat Menschiks und des Psychiaters Doctor medicinae Jakob Hein Illustriertes Kompendium der psychoaktiven Pflanzen**

Verlag: Galiani Berlin  
 € 22,-

## Eine umfangreiche und auch anspruchsvolle Darstellung der Kosmologie

Dieses Buch bietet viele Informationen, fachlich und didaktisch kompetent aufbereitet. Vorkenntnisse sollten jedoch vorhanden sein.

► Mein Eindruck nach dem Lesen des über 500 Seiten starken Buchs: kompetent und anspruchsvoll. Die Darstellung der Kosmologie ist nicht populärwissenschaftlich, sondern benutzt explizit Formeln – Vertrautheit mit den Grundlagen der Analysis ist von Vorteil. Mit weniger Vorkenntnissen dürfte man dagegen Schwierigkeiten haben, dem anspruchsvollen Inhalt adäquat zu folgen. Hinzu kommt, dass Gaßner und Müller auf ihrem Buch »Können wir die Welt verstehen?« von 2019 aufbauen. Beide sind Astrophysiker und mit der Universitätssternwarte München verbunden; Gaßner ist Schüler von Müller. Ihre fachliche und didaktische Kompetenz steht außer Frage. Es gibt zahlreiche Publikationen, insbesondere zum Thema Kosmologie (einige zusammen mit Harald Lesch).

Das Buch enthält zwölf Kapitel. Los geht es mit einer 73-seitigen Darstellung der Thermodynamik, die nach Ansicht der Autoren als »Motor der Veränderung« für das Verständnis des Kosmos und seiner Entwicklung unerlässlich ist – zu Recht. Schon auf den ersten Seiten zeigt sich das didaktische Konzept. Die historisch relevanten Personen, wie etwa Helmholtz, Clausius und Boltzmann, werden in Wort und Bild vorgestellt und ihre Beiträge ausführlich erläutert. Auch moderne Aspekte der Thermodynamik spielen eine Rolle. Dabei wird explizit auf Verbindungen zu anderen Disziplinen, wie etwa der Quantenfeldtheorie, hingewiesen. Beispiele sind der Unruh-Effekt, die Hawking-Strahlung und das Rindler-Universum.

Dass es beim Lesen Überraschungen geben wird, konnte man bereits

dem Vorwort entnehmen: »Sie werden mit schier unglaublichen Dingen konfrontiert, die Sie eventuell an Ihrem Verstand zweifeln lassen.« So erfährt man, dass es eine »negative absolute Temperatur« gibt und ein physikalisches System »heißer als unendlich« sein kann! Viele farbige Grafiken und Bilder sowie diverse Einschübe (z. B. zum Noether-Theorem) fördern das Verständnis. Schwierige Passagen sind durch das Verkehrszeichen »Vorsicht, Schleudergefahr« gekennzeichnet; das Zeichen für »Aufhebung« soll wohl Entwarnung bedeuten. Vertiefende Informationen können über QR-Codes abgerufen werden, es gibt auch eine Webseite.

Das zweite Kapitel ist mit »Urknall und Expansion – Das große Ganze« überschrieben; mit 125 Seiten ist es das umfangreichste. Die historische Einführung zeigt Porträts von Newton, Friedmann, Lemaître und Hubble. Das von Einstein sucht man übrigens vergebens – der Begründer der modernen Kosmologie kommt im Register nur viermal vor. Tatsächlich sind es etwas mehr Stellen, hier wurde nicht korrekt gearbeitet. Trotzdem, auch der Allgemeinen Relativitätstheorie ist nur ein kurzer Abschnitt gewidmet. Dagegen nehmen die Friedmann-Gleichungen, die Einstein zunächst aus physikalischen Gründen ablehnte, einen breiten Raum ein. Nachfolgend wird ausführlich auf die Inflationstheorie, als Lösung der Horizont- und Flachheitsprobleme, eingegangen. Hier kommen auch die beschleunigte Expansion und die obscure Dunkle Energie ins Spiel. Spekulative Konzepte, wie Ewige Inflation, Multiversum oder Schleifenquantentheorie, runden das Kapitel ab. Fans der Stringtheorie



Josef M. Gaßner, Jörn Müller

### Kosmologie

Verlag: S. FISCHER

€ 33,-

scheinen Gaßner und Müller dagegen nicht zu sein: Sie wird – vielleicht in weiser Voraussicht? – ignoriert.

Im dritten Kapitel »Das Holographische Prinzip – Leben wir in einer Matrix?« wollen uns die Autoren »kurz am Giftschränk der kosmologischen Modelle vorbeiführen«, um dann mit dem immer noch ungelösten Problem der Dunklen Materie fortzufahren. Besonders lobenswert ist das nachfolgende Kapitel »Entfernungen und kosmische Horizonte«. Fachzeitschriften, die Leserbriefe abdrucken, wie etwa »Sterne und Weltraum«, werden immer wieder mit Fragen zur relativistischen Kosmologie konfrontiert, etwa »Wie kann eine Galaxie weiter als 13,8 Milliarden Lichtjahre entfernt sein?« oder »Wie kann der Urknall ein Punkt sein, wenn doch die Hintergrundstrahlung aus allen Richtungen kommt?«. Geduldig versuchen die Redakteure, die geistigen Verknotungen zu lösen. Hier liefern Gaßner und Müller letztlich alle Antworten.

In den weiteren Kapiteln kann der Leser die anstrengende Theorie hinter sich lassen und etwas entspannen. Hier geht es um die Entstehung und

Entwicklung der gängigen Objekte, angefangen bei den ersten chemischen Elementen über Sterne bis hin zu Galaxien und Galaxienhaufen. Natürlich fehlen auch Schwarze Löcher, Supernovae und Antimaterie nicht. Im abschließenden Kapitel 12 »Anthropisches Prinzip – Was hat das alles mit uns zu tun?« wird es dann wieder spekulativ.

Wer es bis hierhin geschafft hat, ist mit einer Fülle von Informationen versorgt worden, die es zu verdauen gilt. Man kann das Buch aber weiterhin als Nachschlagewerk nutzen. Dabei hilft das umfangreiche Register. Leider fehlt ein Literaturverzeichnis – soll man es sich anhand der Links selbst erstellen? Es gibt nur

wenige Fehler, meist redaktioneller Art. So müsste auf Seite 35 in der Formel  $p = N \cdot k \cdot T$  ein kleines »n« stehen.

Fazit: Gaßner und Müller haben eine rundum gelungene Darstellung der Kosmologie vorgelegt, die keine Wünsche offenlässt. Das Buch ist inhaltlich auf dem neuesten Stand und mit großem Sachverstand in verständlicher Sprache geschrieben. Layout und Einband überzeugen. Vom Niveau und Umfang hebt es sich von vielen populärwissenschaftlichen Darstellungen wohltuend ab. Leser mit mathematisch-physikalischen Vorkenntnissen werden am meisten profitieren – vorausgesetzt, sie investieren ausreichend Zeit und Muße für

die »größte Geschichte aller Zeiten«. Aber auch bei Studenten und Wissenschaftlern kann der didaktisch vorbildlich präsentierte Stoff sicher noch Wissenslücken füllen. Am Ende muss jeder selbst entscheiden, ob das eingetreten ist, was auf der Rückseite steht: »Wer sich auf dieses Buch einlässt, wird unsere Welt und die eigene Existenz mit völlig neuen Augen betrachten!«

**Wolfgang Steinicke** ist Physiker und Mitglied der Vereinigung der Sternfreunde e.V., deren Fachgruppe »Geschichte« er leitet. Er ist außerdem Herausgeber des »Praxishandbuch Deep-Sky«.

## Fragen und Antworten zum Klimawandel

**Auf die Fragen zum Klimawandel gibt es keine einfachen Antworten – dieses Buch bietet umfangreiche Informationen, ist jedoch zum Teil nicht leicht verständlich.**

► Sind Wetter und Klima dasselbe? Gibt es Wetterdaten, die einer Klimaerwärmung entgegenstehen? Auf diese und viele andere Fragen versucht das Buch »Klimawandel FAQs« Antworten zu geben und den Leser für Diskussionen mit Argumenten auszustatten.

Auf 409 Seiten verfolgen die beiden Klimageographen Arno Kleber und Jana Richter-Krautz das noble Ziel, wissenschaftliches Arbeiten und Publizieren für Laien aufzubereiten, um vermeintliche Fakten in Diskussionen richtig einordnen zu können. Beide lehren Klimawissenschaften an Universitäten und haben nun ihre Expertise in neun Kapiteln aufbereitet, wobei erst ab Kapitel 4 eine Fragen-Struktur, die man beim Titel »Klimawandel FAQs« erwartet, zu erkennen ist.

Die ersten drei Kapitel sollen dem Leser die Grundlagen des Wissenschaftsbetriebs sowie die Geschichte

der Klimaforschung und wichtige Begriffe der Klimawissenschaften vermitteln. Die Unterscheidung zwischen dem momentanen Zustand der Atmosphäre, dem Wetter, und dem rechnerischen Durchschnittswert von längeren Wetteraufzeichnungen, dem Klima, ist essenziell für das Verständnis der weiteren Erklärungen im Buch. Auch Treibhausgas, Treibhauseffekt und Strahlungsantrieb werden in diesem ersten Drittel des Buches beschrieben.

Für nicht wissenschaftlich tätige Leser sind komplexe Vorgänge im Wissenschaftsbetrieb wie beispielsweise der Review-Prozess nicht so einfach nachzuvollziehen. Leider gelingt es den Autoren nicht, diese Vorgänge verständlich zu erklären.

Die Autoren nehmen verschiedene Manipulationstechniken unter die Lupe, die von den »Trumpisten«, wie sie im Buch genannt werden, oft angewendet werden. Hier stechen



Arno Kleber, Jana Krautz

### Klimawandel FAQs

Verlag: Springer Berlin Heidelberg

€ 19,99

die Scheinkausalität, also das In-den-Zusammenhang-Stellen von zwei Ergebnissen, und das »Rosinenpicken«, der Verweis auf einzelne Fälle oder Daten, heraus. Letzteres wird beispielsweise immer wieder verwendet, um gegen die globale Klimaerwärmung zu argumentieren, da es ja

Daten gäbe, die das Gegenteil besagen. Dabei handelt es sich aber um Messungen aus geografisch besonderen Regionen, die nicht repräsentativ für die Welt sein können.

Im zweiten Teil des Buches, also den Kapiteln 4 bis 9, wird dann konkreten Fragen, den FAQs, nachgegangen. Die Fragen sind weiter in Bereiche gegliedert, wie die grundsätzliche Frage der Existenz des Klimawandels, seiner Verursachung durch den Menschen, aber auch, ob der Klimawandel überhaupt schlimm ist. Die Abschnitte folgen immer demselben Aufbau: So wird zuerst eine mehr oder weniger gängige Behauptung zum Klimawandel beschrieben, die dann im Folgenden in Bezug auf verschiedene Manipulationstechniken und Wissenschaftlichkeit eingeordnet wird.

Am Anfang steht immer ein knappes Statement, in dem die Einordnung zusammengefasst wird, optisch durch einen grauen Hintergrund abgegrenzt. Dann folgt eine etwas ausführlichere Beschreibung, die fett gedruckt ist. Schließlich kommt die ausführliche Erklärung mit allen wissenschaftlichen Grundlagen.

Den Beschreibungen der diversen »alternativen Erklärungen« für den Klimawandel ist allein in ihrer Ausführlichkeit und Verschlungenheit schwer zu folgen. Wobei die Anzahl dieser »Fragen« ein weiterer Punkt ist, der den Leser leicht überfordern kann.

In den ebenso ausführlichen Erklärungen und Einordnungen ist die Expertise von Kleber und Richter-Krautz klar erkennbar und es werden viele interessante Fakten erläutert. So lernt der Leser beispielsweise, dass die aktuell verwendeten Klimamodelle »gekoppelte Atmosphäre-Ozean-Zirkulationsmodelle« der 5. und 6. Generation sind, die aufgrund der vielen Teilsysteme, die sie berücksichtigen, enorm komplex sind.

Trotzdem erinnert der gesamte Aufbau des Buches an eine wissenschaftliche Publikation – als Sachbuch ist es wahrscheinlich für die breite Bevölkerung nicht immer leicht verständlich. Dazu tragen auch die langen und oft verschachtelten Sätze bei, was dazu führt, dass so mancher

Satz erst nach mehrmaligem Lesen seinen Kontext offenbart; gerade auch weil die Zitate im Text den Lesefluss stören. Außerdem enthält das Buch nicht nur am Ende ein umfangreiches Literaturverzeichnis, sondern auch nach jedem Kapitel.

Wer sich kurze und knackige Antworten auf FAQs zum Klimawandel erwartet, wird mit diesem Buch enttäuscht werden. Jedoch gibt es eben zumeist keine kurzen Antworten in der Klimawissenschaft. Für Leser, die fundierte Fachkenntnisse zum Thema suchen und auch bereit sind, sich darin zu vertiefen, ist dies allerdings genau die richtige Lektüre.

**Victoria Lunz** ist Molekularbiologin und Wissenschaftsjournalistin in Linz.



# DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



**Spektrum**  
der Wissenschaft  
**DIE WOCHE**

NR **11**  
16.03  
2023

**PESTIZIDE IN DEUTSCHLAND**  
**Zu viel, zu verbreitet und gefährlicher als gedacht**  
In der Hälfte der Kleingewässer liegt die Konzentration an Pestiziden über den Höchstwerten. Die Grundannahmen zur Sicherheit von Pflanzenschutzmitteln sind womöglich falsch.

**MEERESSTRÖMUNGEN**  
Rettungsringe für den Golfstrom

**ORDNUNGSBEDÜRFNIS**  
»Würdest du mich wirklich lieben, würdest du mehr aufräumen!«

- » Exotisches Material: Supraleitung bei 21 Grad
- » Evolution: Die kleinstmöglichen Giganten der Meere
- » Zehntausende Vogelbruten in der Antarktis vernichtet
- » Vulkanausbruch auf der Venus entdeckt?

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)

