

Spektrum

der Wissenschaft

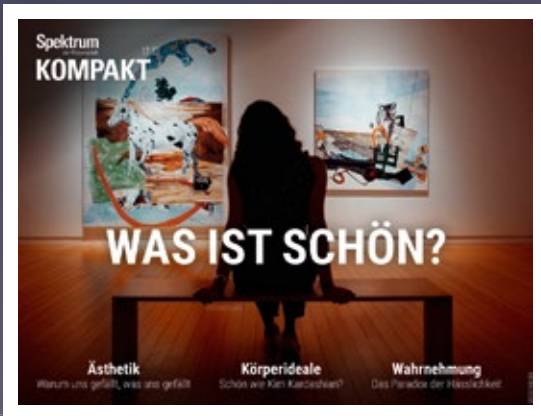
Außerirdisches Leben

Neue Raumsonden nehmen
Jupiters Monde ins Visier

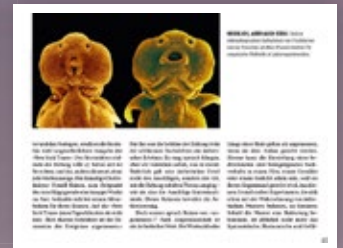
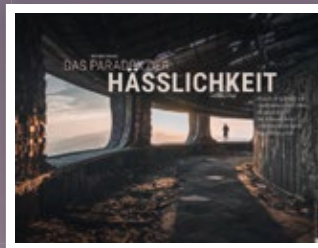
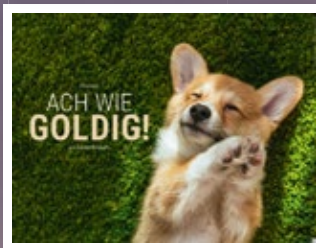


ANTIBIOTIKA Wie kann man Resistenzen verhindern?
ENERGIESPEICHER Mit Mathematik zu besseren Batterien
DEKARBONISIERUNG Klimaschonender Beton

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

Spektrum wird Teil von Forschungsarbeiten



Daniel Lingenhöhl
 Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

Während ich diese Zeilen schreibe, blicke ich aus meinem Hotelzimmerfenster auf die Kieler Förde. Ich bin hier, weil der Verlag »Spektrum der Wissenschaft« seit 2023 als Medienpartner mit dem Kiel Science Communication Network (KSCN) zusammenarbeitet, einem interdisziplinären Forschungszentrum für Wissenschaftskommunikation. Das Ziel dieses Verbunds ist

es, neue visuelle und interaktive Formate zu schaffen, mit denen Forschung anschaulich vermittelt werden kann. Das soll aber nicht als Einbahnstraße geschehen: Nutzerinnen und Nutzer werden auch die Möglichkeit bekommen, Infografiken zu bearbeiten, anzupassen und zu verbessern. »Spektrum« wird diese (entsprechend ausgewiesenen) Inhalte online zur Verfügung stellen.

Gleichzeitig wird daran geforscht, wie Interessierte diese Angebote an- und wahrnehmen. Wie beteiligen sie sich? Kann sich Wissenschaftskommunikation dadurch verbessern und wenn ja, wie?

Zufällig ist im Rahmen der Vorgespräche zu dieser Kooperation auch ein Thema der vorliegenden Ausgabe entstanden: »Mit Darwin gegen die Antibiotikakrise« über die Evolution der Antibiotikaresistenzen von Hinrich Schulenburg (ab S. 52). Der Kieler Wissenschaftler berät das KSCN fachlich und widmet sich mit seinem Team dem drängenden Problem, dass mehr und mehr Antibiotika ihre Wirkung gegen Keime verlieren.

Schulenburg setzt darauf, dass die Evolution den Mikroben nicht nur hilft, Resistenzen gegen solche Arzneistoffe zu entwickeln. Stattdessen könnte sie umgekehrt auch zur Achillesferse der Keime werden. Im Labor haben erste Ansätze, die Weiterentwicklung der Bakterien gezielt zu lenken und die Erreger dabei in evolutionäre Sackgassen zu lotsen, bereits Erfolge gezeigt. Nun bleibt zu hoffen, dass dies bald ebenso im klinischen Einsatz gelingt.

Erste Infografiken aus diesem Artikel wiederum bilden den Auftakt für unser Projekt mit dem KSCN. Und vielleicht haben auch Sie Interesse, damit ein wenig zu experimentieren? Dann lade ich Sie herzlich dazu auf unserer Seite ein:

www.spektrum.de/s/antibiotikakrise

Viel Erfolg wünscht Ihr

In dieser Ausgabe

COLLEGE OF NATURAL SCIENCES AT UO ALISTIN



Steven Phelps (links), Zoe Donaldson, Devanand Manoli

Die drei Biologen verraten ab S. 44, was kleine Nagetiere über die Geheimnisse der Liebe erzählen.

Hinrich Schulenburg

Bakterielle Infektionen werden immer bedrohlicher, weil Antibiotika an Wirkung verlieren. Mit evolutionären Ansätzen lässt sich das verhindern, erläutert der Forscher ab S. 52.



Manuel Landstorfer (rechts), Martin Heida



Die beiden Mathematiker möchten mit Hilfe von Computersimulationen Batterien leistungsfähiger und langlebiger machen (S. 72).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

TITELTHEMA

12 Sind Jupiters Monde lebensfreundlich?

Zwei Raumsonden sollen nach flüssigem Wasser unter der Oberfläche suchen.

Von Jonathan O'Callaghan

19 Fremdartige Ozeane

Ein Überblick über das mögliche Innenleben von sechs Monden im äußeren Sonnensystem.

Von Rebecca Boyle

24 Leben auf anderen Welten

Aliens könnten völlig anders beschaffen sein als alles, was wir von der Erde kennen.

Von Sarah Scoles

FORSCHUNG AKTUELL

32 Schneller fliegen dank Genverlust

Wieso Kolibris wie Helikopter schwirren können.

35 Reaktionsabläufe rasch analysiert

Mathematisches Lernmodell bringt Durchbruch.

38 Steinzeitschmuck enthält Erbgut seiner Trägerin

Was Schweiß über Menschen von einst verrät.

41 IMPRESSUM

SPRINGER'S EINWÜRFE

43 Die Jugend von heute ...

Früher war alles besser – vermeintlich.

VERHALTENSFORSCHUNG

44 Neurobiologie der Liebe

Kleine Nagetiere liefern uns überraschende Erkenntnisse darüber, wie soziale Bindungen entstehen.

Von Steven Phelps, Zoe Donaldson und Devanand Manoli

MEDIZIN

52 Wider die Antibiotikakrise

Antibiotika verlieren an Wirkung. Durch Steuern der Mikrobenevolution lässt sich das verhindern.

Von Hinrich Schulenburg

TITELBILD:
NASA/JPL-CALTECH (EUROPA.NASA.GOV/RESOURCES/182/2021-EUROPA-CLIPPER.SPACECRAFT-ARTISTS-CONCEPT/);
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

FREISTETTERS FORMELWELT

59 Wo endet das Sonnensystem?

Dort, wo der Einfluss der Sonne aufhört. Aber es ist gar nicht so einfach, einen genauen Ort festzulegen.

ZEMENTHERSTELLUNG

60 Neuerfindung eines Baumaterials

SERIE: KLIMANEUTRALE INDUSTRIE (TEIL 2) Beton, der am meisten genutzte Baustoff, hat eine verheerende Klimabilanz. Das soll sich ändern.

Von M. Mitchell Waldrop

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

68 Schreiben mit Strom

Farbige Botschaften und Skizzen lassen sich auf unkonventionelle Weise zu Papier bringen.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

BATTERIEFORSCHUNG

72 Energie effizienter speichern

Batterien mittels mathematischer Modellierung exakt zu beschreiben, hilft dabei, die Funktion der Geräte genauer zu verstehen und dadurch zu verbessern.

Von Manuel Landstorfer und Martin Heida

80 FUTUR III

82 VORSCHAU

Weitere Beiträge

Im PDF der Digitalausgabe sowie unter spektrum.de/aktion/zusatzinhalte finden Sie die folgenden zusätzlichen Artikel:

ARCHÄOLOGIE

Das Rätsel um den Nestorbecher

SCHLICHTING!

IM BILD

REZENSIONEN



12 Leben auf fremden Welten?

SENIOR SALINE / SCIENTIFIC-AMERICAN MAI 2023

44 Neurobiologie der Liebe



AUBREY M. KELLY



52 Antibiotika-resistenzen

ANGELOP / GETTY IMAGES / ISTOCK



60 Klimafreundlicher Beton

SERGEIKOPOROV / GETTY IMAGES / ISTOCK



72 Batterieforschung

JUST_SUPER / GETTY IMAGES / ISTOCK



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

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

SPEKTROGRAMM



MASA, ESA, A. BARTH (UNIVERSITY OF CALIFORNIA IRVINE), AND M. REWALSKI (STSCI);
PROCESSING: CLAUDS KOBER (NASA/GSFC/CIIC), UNIVERSITY OF AMERICA (WWW.MASA.GOV/
IMAGE FOR THE GOOD AND BEAUTIFUL); NEWCASTLE UNIVERSITY (WWW.NUNO.COM)

Sterninsel mit glühendem Kern

Die linsenförmige Galaxie NGC 5283 enthält einen aktiven galaktischen Kern – eine extrem helle Region, in deren Zentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch sitzt. Materie, die in dieses Monster fällt, erhitzt sich stark und leuchtet auf.

NGC 5283 ist etwa 145 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Sie gehört zu den so genannten Seyfertgalaxien, die rund zehn Prozent aller bekannten Sterninseln stellen. Auf der Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops ist die Galaxie klar zu erkennen. Das unterscheidet Seyfertgalaxien von anderen Sterninseln mit aktivem Kern, deren helle Zentralregion alles überstrahlt.

Bei den filamentösen Strukturen im Bildvordergrund handelt es sich um interstellaren Staub, der kurzweiliges Licht absorbiert und deshalb rötlich erscheint. Das bläuliche kompakte Objekt oben rechts ist eine Spiralgalaxie im Hintergrund.

NASA-Mitteilung vom 5. Mai 2023

ANTHROPOLOGIE

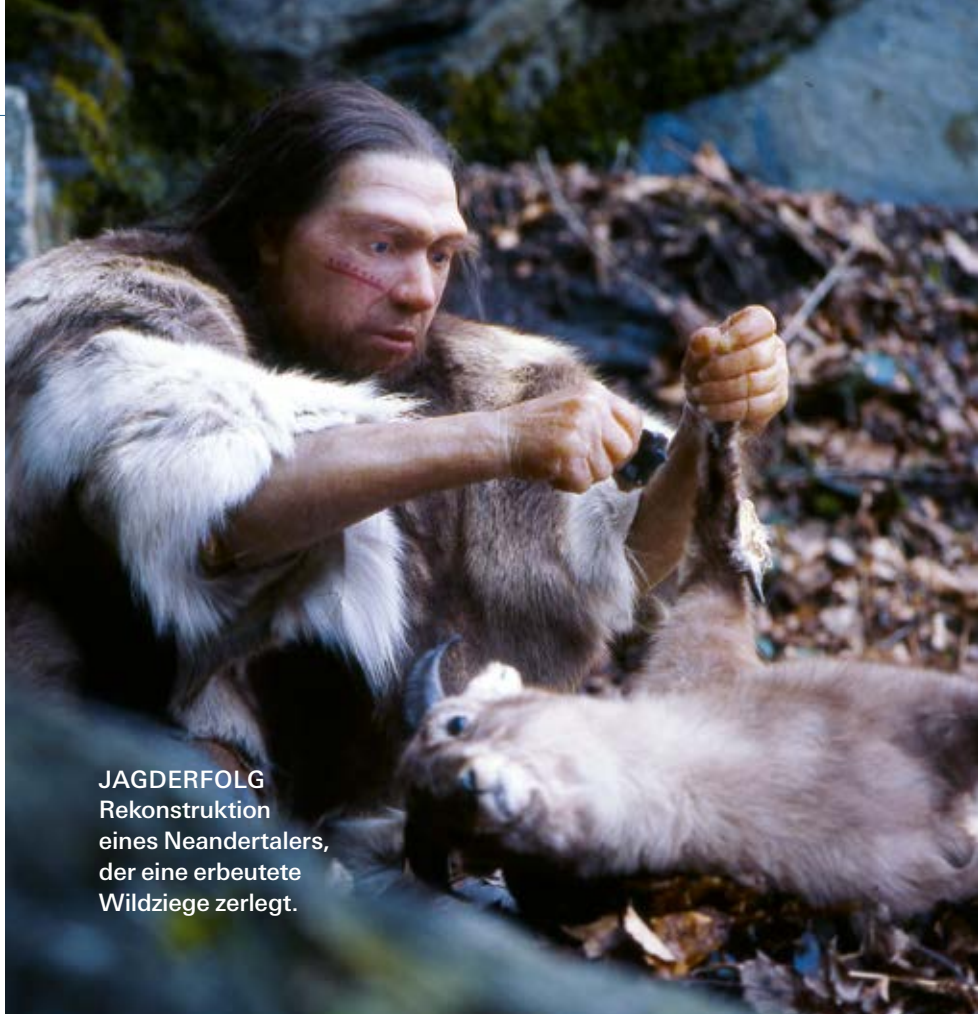
Neandertaler hatten größere Jagdreviere als moderne Menschen

Bei der Nahrungssuche deckten Neandertaler anscheinend deutlich größere Gebiete ab als moderne Menschen. Empirischen Daten zufolge durchstreiften sie Areale, die mit der Fläche von Hamburg vergleichbar waren, während sich steinzeitliche *Homo sapiens* in nur halb so großen Revieren bewegten. Das fanden Fachleute um Bethan Linscott von der University of Oxford heraus, indem sie den Schmelz fossiler Menschenzähne analysierten. Die Überreste stammen aus portugiesischen Karsthöhlen bei Almonda in der Estremadura.

Den Messdaten zufolge haben die Neandertaler jener Region vor 95 000 Jahren größere Tiere gejagt als *Homo-sapiens*-Vertreter, die dort 80 000 Jahre später in der Kulturstufe des Magdaléniens lebten. Wie das Team vermutet, könnte dies mit Unterschieden mit der Bevölkerungsdichte zusammenhängen. Zur Zeit der Neandertaler hätten deutlich weniger Individuen die Landschaft besiedelt als 80 Jahrtausende später, wodurch es nicht so viel Konkurrenz um Jagdbeute gegeben habe.

Linscott & Co. untersuchten den Schmelz von zwei Neandertalerzähnen und einem *Homo-sapiens*-Zahn aus dem Magdalénien. Sie ermittelten das Verhältnis verschiedener Strontium-Isotope darin. Diese Atomsorten sind im Boden enthalten, wo ihre jeweiligen Konzentrationen je nach Standort variieren. Über das Wasser und die Vegetation gehen sie in die Nahrungskette von Tieren und Menschen über. Schließlich lagern sie sich im Zahnschmelz ab und dokumentieren so, wo das entsprechende Individuum gelebt und sich ernährt hat.

Dank eines Laserverfahrens konnte das Team die Strontium-Isotopenverhältnisse im Zahnschmelz auf



JAGDERFOLG
Rekonstruktion eines Neandertalers, der eine erbeutete Wildziege zerlegt.

einzelne Jahre genau aufschlüsseln. Der Vergleich mit den Isotopenwerten der Region erlaubte es dann nachzuvollziehen, in welchem Radius sich die Menschen einst bewegt hatten. Die Neandertaler waren demnach in einem schätzungsweise 600 Quadratkilometer großen Gebiet unterwegs; *Homo sapiens* hingegen auf etwa 300 Quadratkilometer.

Parallel dazu untersuchte die Forschungsgruppe Tierüberreste, welche ebenfalls in den Almonda-Höhlen frei gelegt wurden. Dabei erfasste sie sowohl Strontium- als auch Sauerstoff-Isotopendaten – Letztere geben Auskunft darüber, zu welcher Jahreszeit die Isotope in den Tierkörper gelangt sind. Laut den Ergebnissen jagten die Neandertaler das ganze Jahr über Wildpferde, Rotwild und Nashörner, im Sommer zusätzlich noch Wildziegen. *Homo sapiens* dagegen stellte kleinerem Getier nach: vor allem Hasen, aber auch Fisch und ebenfalls Wildziegen.

PNAS 10.1073/pnas.220450112, 2023

GEOLOGIE

New York sinkt ein

Rund 760 Millionen Tonnen wiegen alle Gebäude von New York zusammengenommen. Ihr Gewicht lässt Teile der Stadt langsam in den Boden sinken; manche Gebäude um bis zu 60 Zentimeter. Das berichtet eine Forschungsgruppe um Tom Parsons vom United States Geological Survey. Das Ausmaß des Effekts hängt davon ab, wie stabil das Material im Untergrund ist – deswegen bewegen sich verschiedene Stadtbezirke in unterschiedlichem Tempo abwärts. Wichtig ist das vor allem im Hinblick auf Überschwemmungsrisiken. Viele Küstenstädte rund um den Globus sacken derzeit – manche sogar deutlich schneller, als der Meeresspiegel steigt. Das hat maßgeblichen Einfluss auf die Überflutungsgefahr.

Großflächige Bodenabsenkungen verursachen in Küstenregionen

enorme Probleme. Sie können verschiedene Ursachen haben. Dass sich Gebäude infolge ihres eigenen Gewichts setzen, ist bekannt und muss bei der Bauplanung insbesondere von Hochhäusern berücksichtigt werden. Die indonesische Hauptstadt Jakarta hingegen bewegt sich um knapp elf Zentimeter jährlich in die Tiefe, weil in ihrem Gebiet Grundwasser abgepumpt wird. Auch großräumige Ausgleichsbewegungen nach dem Ende der letzten Eiszeit, die Förderung von Öl und Gas oder Bewegungen des Sediments in Flussdeltas sorgen für Bodensenkungen.

Über ihr gesamtes Areal gemittelt sinkt New York City um ein bis zwei Millimeter pro Jahr. Die Metropole gehört sowohl hinsichtlich der Anzahl gefährdeter Menschen als auch der bedrohten Sachwerte zu den zehn Großstädten weltweit, in denen die größten Risiken durch Überschwemmung bestehen. Ihr langfristiger Höhenverlust rührt vor allem daher, dass mächtige Gletscher während der letzten Eiszeit die Erdkruste weiter nördlich nach unten drückten und dadurch die Regionen weiter südlich (einschließlich des heutigen Stadtgebiets) anhoben – ähnlich einer Wippe. Nach dem Verschwinden der Eismassen gleicht sich das nun allmählich wieder aus.

Parsons und sein Team unterteilten New York bei Computersimulationen in 100 mal 100 Meter große Quadrate und berechneten für jedes davon die Auflast sowie die Kompression des darunterliegenden Materials. Die Ergebnisse verglichen sie mit Satellitendaten. Wenig überraschend zeigte sich, dass die größten Senkungen dort stattfinden, wo der Untergrund locker, sandig oder lehmig ist. Manche Stadtbezirke sacken auch unabhängig von der Bebauung stark ab. Verantwortlich dafür dürften unter anderem die Entnahme von Grundwasser und die Oberflächenerosion sein.

ASTRONOMIE

Ist Beteigeuze bereits explodiert?

▶ Immer wieder spekulieren Fachleute, ob der Rote Überriese Beteigeuze im Sternbild Orion möglicherweise kurz davor steht, in einer Supernova zu detonieren. Darauf deutet unter anderem hin, dass er seltsam flackert. Ein Forschungsteam um Hideyuki Saio von der Universität Tokio kommt jetzt zu dem Schluss, dass Beteigeuzes Ende tatsächlich näher sein könnte als gedacht. Sollte er explodieren, erschiene er uns einige Wochen lang leuchtstärker als die Venus und wäre nach Sonne und Mond das dritthellste Objekt am Himmel.

Bei einer Supernova stürzt ein massereicher Stern in sich zusammen, weil in seinem Kern die Fusion chemischer Elemente aufhört und der dort entstehende Gas- und Strahlungsdruck schlagartig abfällt. Der Himmelskörper kollabiert dann binnen weniger Millisekunden unter seinem eigenen Gewicht. Sein herab-

fallendes Material prallt am komprimierten Sternkern zurück und rast nach außen weg, was zusammen mit Myriaden entstehender Neutrinos die Supernova hervorbringt.

Dem Roten Überriesen Beteigeuze im Sternbild Orion, der fast 20 Sonnenmassen auf die Waage bringt und am Ende seines Lebens steht, könnte das bereits in einigen zehn Jahren blühen. Neue Indizien dafür haben Saio und sein Team jetzt vorgelegt. Sie schauten sich die Lichtkurven des Giganten an. Darin finden sich Hinweise auf ein radiales Pulsieren. Dessen Periode spricht laut Computermodellen dafür, dass die Phase des Kohlenstoffbrennens im Innern von Beteigeuze weitgehend abgeschlossen ist. Falls das zutrifft, geht der Riese nun in eine instabile Phase über und könnte schon bald zusammenstürzen. Möglicherweise ist das sogar schon passiert, denn Beteigeuze befindet sich so weit von uns entfernt, dass wir alles, was auf ihm geschieht, erst 550 Jahre später sehen.

Besonders großes Interesse an dem Ereignis haben Gravitationswellenforscher. Denn die zu erwartende

VOR DEM KNALL Wenn der Riesenstern Beteigeuze (hier eine Aufnahme des Very Large Telescope in Chile) als Supernova explodiert, wird er uns heller erscheinen als die Venus.



Supernova dürfte die Raumzeit derart heftig erschüttern, dass sie es erstmals erlauben wird, die einsteinschen Raumzeitwellen einer direkt beobachtbaren Kernkollaps-Supernova zu untersuchen.

arXiv 10.48550/arXiv.2306.00287, 2023

BOTANIK

Phosphormangel macht Pflanze zum Fleischfresser

Das Hakenblatt (*Triphyophyllum peltatum*) kommt ausschließlich in westafrikanischen Regenwäldern vor und bildet Lianen aus, die bis zu 70 Meter lang sein können. Es ist die einzige bekannte Pflanze, die bei Bedarf in ein Fleisch fressendes Stadium übergeht. Sie entwickelt dann Fangblätter mit großen Sekretropfen, an denen Insekten kleben bleiben und anschließend mittels spezieller Enzyme verdaut werden. Bislang war unbekannt, was diese Verwandlung auslöst.

Einer Forschungsgruppe ist es nun gelungen, Hakenblatt-Exemplare in einem Gewächshaus zu kultivieren

und deren ungewöhnlichem Verhalten auf den Grund zu gehen. Das Team um Traud Winkelmann vom Institut für Gartenbauliche Produktionssysteme der Universität Hannover setzte die Pflanzen verschiedenen Stressfaktoren aus, darunter einem Mangel an unterschiedlichen Nährstoffen, und beobachtete jeweils die Reaktion darauf. Nur in einem Fall trat der Wandel zum Fleischfresser auf: wenn es an Phosphor fehlte.

In ihrem Lebensraum, den Tropenwäldern Westafrikas, gedeiht *Triphyophyllum peltatum* auf nährstoffarmen Böden. Dort kann sie einem drohenden Phosphormangel offensichtlich begegnen, indem sie optional Insekten fängt und verdaut und so an das wichtige Element kommt. Diese Erkenntnisse ebnen den Weg zu molekularen Analysen, die möglicherweise den Ursprung der karnivoren (Fleisch fressenden) Lebensweise bei Pflanzen aufklären helfen, wie die Forscherinnen und Forscher betonen.

Das Hakenblatt ist auch für die medizinisch-pharmazeutische Forschung von großem Interesse. Von einigen Inhaltsstoffen der Pflanze wird vermutet, dass sie gegen Bauchspeicheldrüsenkrebs, Leukämie oder Malaria wirken könnten.

New Phytologist 10.1111/nph.18960, 2023

VERWANDLUNGSKÜNSTLER Das Hakenblatt entwickelt lange Triebe mit gebogenen Fortsätzen zum Festhalten. Bei Bedarf prägt es Fangblätter mit Sekretropfen aus, an denen Insekten kleben bleiben.



PHYSIK

Warum Champagner anders blubbert als Cola

Die fein perlenden Bläschen des Champagners sind für den Trinkgenuss wichtig, darüber hinaus aber auch ein physikalisches Rätsel. Denn sie steigen in geraden, geordneten Reihen auf – dabei müssten sie nach den Regeln der Hydrodynamik trichterförmig auseinanderstreben. Eine Erklärung dafür liefern nun Physiker um Omer Atasi von der Université libre de Bruxelles.

In normalen Sprudelgetränken wie Cola erzeugen die emporstrebenden Blasen unter sich Wirbel, die nachfolgende Bläschen zur Seite drücken. Denn die Wirbel rotieren bei aufeinander folgenden Gasblasen jeweils mit spiegelverkehrttem Drehsinn – wodurch jede Perle auf ihren Nachfolger eine Kraft ausübt, die entgegengesetzt zu jener ist, die sie selbst erfährt. Infolgedessen läuft die Perlenkette auseinander.

Auf Grund einer chemischen Besonderheit passiert das in Scharmpus nicht, berichten Atasi und sein Team. Champagner enthält große Mengen oberflächenaktiver Substanzen mit Fettsäuren. Diese Verbindungen besitzen einen Molekülteil, der sich gut in Wasser löst, und einen weiteren, bei dem das nicht der Fall ist. Sie lagern sich so an die Gasbläschen an, dass ihr wasserlöslicher Teil

WIE AM SCHNÜRCHEN
Champagnergläser sind schlank und hoch – unter anderem deshalb, weil so die geraden Ketten aufsteigender Gasbläschen schön zu sehen sind.

in die Flüssigkeit und der unlösliche in die Gasphase ragt.

Beim Aufsteigen der Blase treibt die umströmende Flüssigkeit die angelagerten Moleküle vom oberen zum unteren Ende des Hohlraums. Dadurch sammeln sie sich unten in höherer Konzentration, was dort die Oberflächenspannung stärker senkt als oben. Das vorbeifließende Wasser erfährt eine Kraft in Richtung der höheren Oberflächenspannung (der so genannte Marangoni-Effekt) und fließt folglich langsamer an der Blase vorbei, was deren Aufstieg bremst.

Zudem behindern die oberflächenaktiven Substanzen die Strömung in der Grenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit. Mit dem Effekt, dass der größte Teil der Wirbelbildung nun oberhalb und neben der Blase passiert statt unter ihr. Die dabei entstehenden Wirbel rotieren bei aufeinanderfolgenden Perlen nicht mehr spiegelbildlich zueinander, sondern im gleichen Drehsinn, und üben folglich keine entgegengesetzt gerichteten Kräfte aus. Darum bleiben die Bläschen des Champagners in einer sauber geordneten Reihe.

Physical Review Fluids 10.1103/PhysRevFluids.8.053601, 2023

ARCHÄOLOGIE

Der wohl älteste Sattel der Welt

► Archäologen um Patrick Wertmann von der Universität Zürich haben im Nordwesten Chinas einen Ledersattel gefunden, der auf rund 2700 Jahre datiert. Es dürfte das weltweit älteste bekannte Exemplar sein, so die Forscher. Das Reitutensil kam in der Ruhestätte einer Frau auf

den Gräberfeldern von Yanghai (Xinjiang) zum Vorschein.

Laut ¹⁴C-Datierung wurde der Sattel zwischen 727 und 396 v. Chr. gefertigt. Das rund 45 Zentimeter lange Stück ähnelt einem Flügelpaar. Es ist aus Rindslederstücken genäht und mit Tierhaaren sowie Stroh gefüllt. Bänder, um den Sattel am Pferd festzuzurren oder Dinge daran zu befestigen, sind nicht erhalten. Löcher am Rand deuten aber darauf hin, dass es solche Bänder ursprünglich gab.

Im Zuge der Untersuchungen fielen den Fachleuten noch weitere Besonderheiten auf. So besitzt der Sattel zwei mit Riemen verschlossene Schlitze auf der Oberseite, durch die sich vermutlich Stroh und Tierhaare nachfüllen ließ. Weitere Riemen, die durch das Leder gestochen wurden, sorgten dafür, dass das weiche Polstermaterial beim Reiten nicht verrutschte. Da es vor 2700 Jahren keine Steigbügel in China gab (sie kamen dort erst ungefähr 1000 Jahre später auf), dienten die Polster wahrscheinlich als Stütze. Mit ihrer Hilfe konnten sich Reiter möglicherweise aus dem Sattel hochstemmen, um zum Bei-

spiel Pfeile abzuschließen, vermutet Wertmann.

Sicher ist: Das Stück war ausgiebig in Gebrauch. In der Mitte, wo die reitende Person einst saß, ist das Leder deutlich stärker abgerieben als an den Seiten. Offenbar war dafür die Bestattete verantwortlich, wie sich aus der Fundsituation schließen lässt: Die Verstorbene ruhte auf der Seite, die Beine angewinkelt; der Sattel lehnte an ihrem Gesäß. Anscheinend sollte die Frau, die mit Wollhose, Stiefel und Umhang bekleidet war, dezidiert als Reiterin gekennzeichnet werden.

Die zuvor ältesten bekannten Überreste von Sätteln wurden im südsibirischen Altai-Gebirge gefunden, in Gräbern der so genannten Pasyryk-Kultur. Ledersättel waren dort spätestens ab dem 5. Jahrhundert v. Chr. in Gebrauch. Zu reiten fingen Menschen aber wohl schon viel früher an. Die Vertreter der Jamnaja-Kultur beispielsweise saßen in Osteuropa bereits um 3000 v. Chr. regelmäßig auf Pferden, wie aus Untersuchungen ihrer Skelette hervorgeht.

Archaeological Research in Asia 10.1016/j.ara.2023.100451, 2023

GUT GEPOLSTERT Der Sattel aus Xinjiang ließ sich durch zwei Öffnungen mit weichem Material befüllen. Sie waren mit Riemen verschließbar.



PATRICK WERTMANN, UNIVERSITÄT ZÜRICH



SEÑOR SALAME / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2023

AUF EINEN BLICK

Geheimnisse des Gasgiganten

- 1** Frühere Abstecker zu Jupiters Monden haben verborgene Ozeane mit flüssigem Wasser offenbart. Zwischen Eiskruste und Gesteinskern dürften komplexe chemische Vorgänge ablaufen.
- 2** Neue Raumsonden sollen einige der Himmelskörper ausgiebig untersuchen und Aufschluss darüber liefern, ob hier grundsätzlich Leben existieren könnte.
- 3** Im Anschluss müssten spezialisierte Missionen direkte Nachweise etwaiger Organismen erbringen. Doch die technischen Herausforderungen dafür wären immens.

Sind Jupiters Monde lebens- freundlich?

Zwei Raumsonden reisen zu den Monden des größten Planeten des Sonnensystems. Ihre Mission: herauszufinden, ob unter der Eiskruste lebensfreundliche Bedingungen herrschen.

► spektrum.de/artikel/2150661

Jonathan O'Callaghan ist Journalist in London und berichtet über Raumfahrt, Weltraumforschung und Astrophysik.



EUROPA CLIPPER Die US-amerikanische Raumsonde soll zu einem Jupitermond vorstoßen, aus dessen Eiskruste Fontänen aus Wasserdampf schießen.

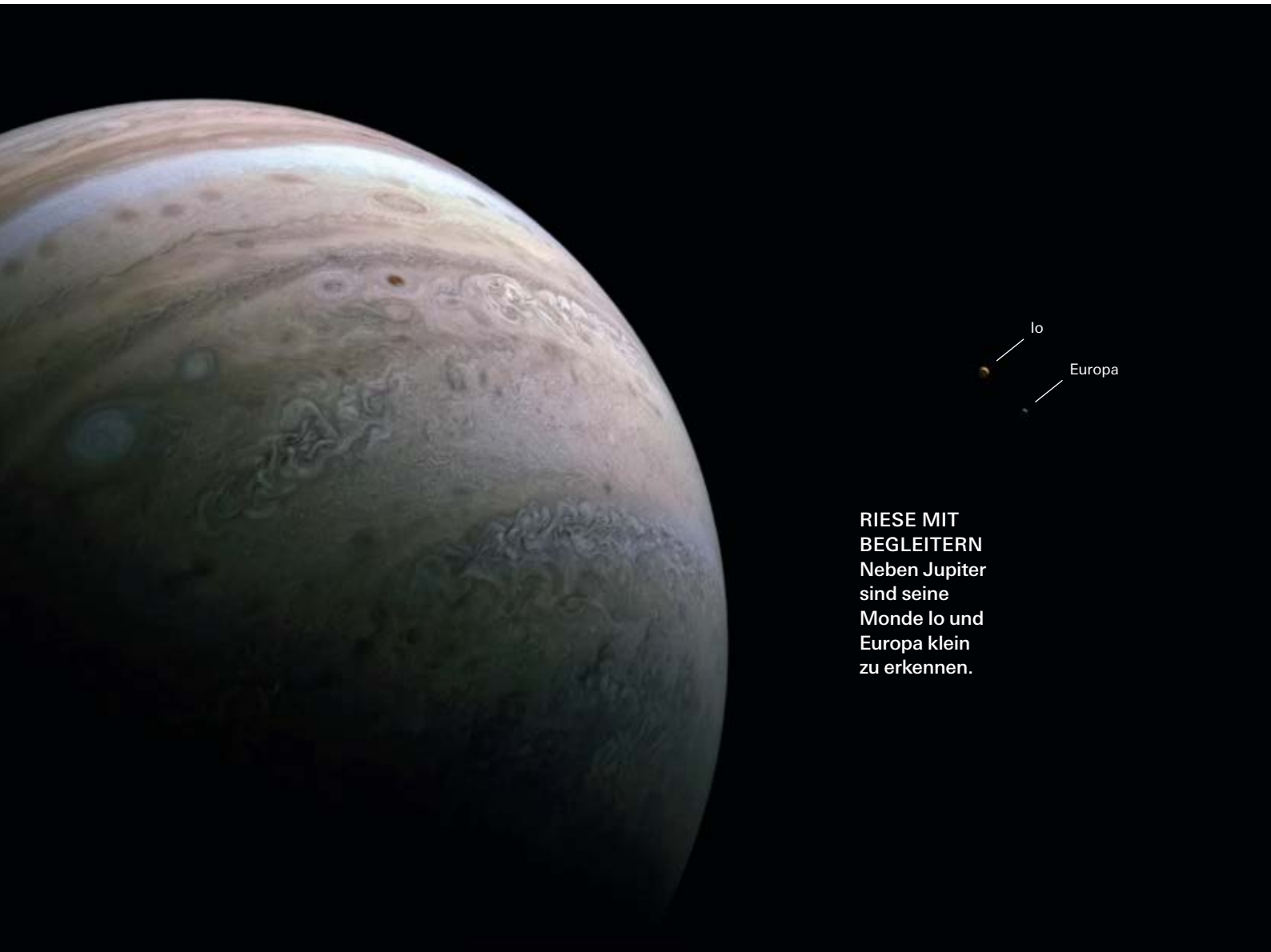
▶ Sollte es anderswo im Sonnensystem Leben geben, dann bieten die großen Eismonde Jupiters möglicherweise gute Bedingungen dafür. Alle wissenschaftlichen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass sich in ihrem Inneren gewaltige Ozeane befinden. Einerseits werden die Monde durch die immense Gravitationswirkung des Riesenplaneten fortwährend durchgeknetet. Das hält sie warm. Andererseits schirmt eine dicke gefrorene Kruste sie vor Strahlung aus seinem Magnetfeld ab.

»Von der Erde wissen wir: Wo Wasser ist, gibt es sehr oft auch Leben«, erklärt der britische Astrobiologe Mark Fox-Powell von der Open University in Milton Keynes. »Heute gibt es im Sonnensystem flüssiges Wasser aber praktisch nur noch bei der Erde und den Monden von Jupiter und Saturn.« Saturn behält viele Geheimnisse vorerst für sich. Fürs Erste sind nun alle Augen auf Jupiter gerichtet.

Denn im April 2023 ist eine neue Mission zum größten Planeten unseres Sonnensystems gestartet, die seine Monde untersuchen und Erkenntnisse darüber liefern soll, wie es um ihre Lebensfreundlichkeit bestellt ist. Der Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) der Europäischen Weltraumorganisation ESA wird Jupiter voraussichtlich

2031 erreichen. Um Treibstoff zu sparen, nutzt JUICE zunächst die Schwerkraft von Erde und Venus für Swing-by-Manöver. Bei ihrer Ankunft am Gasplaneten wird die solarbetriebene Raumsonde ihre diversen wissenschaftlichen Instrumente auf drei der vier größten Jupitermonde richten. Europa, Ganymed und Kallisto sollen unterirdische Ozeane beherbergen. Dabei konzentriert sich die meiste Aufmerksamkeit auf Ganymed. Nach einer ersten Erkundung wird die Sonde 2034 in eine Umlaufbahn um diesen größten Mond des Sonnensystems eintreten. »Wir wollen feststellen, wie es um Ganymeds Bewohnbarkeit bestellt ist«, sagt JUICE-Teammitglied Emma Bunce von der University of Leicester.

Nicht nur die ESA hat Jupiter im Visier. Das Konzept, das JUICE vorangegangen ist, entstand 2008 im Rahmen der Europa Jupiter System Mission (EJSM), eines Gemeinschaftsprojekts mit der US-Raumfahrtbehörde NASA. Ursprünglich sollten die Europäer dabei eine Sonde konstruieren, die sich auf Ganymed fokussiert, während die NASA zum Mond Europa vorstoßen wollte. Finanzierungsprobleme in den USA zwangen die ESA jedoch Anfang der 2010er Jahre zu einem Alleingang. »Uns fehlte das Geld«, resümiert Louise Prockter vom Johns Hopkins



**RIESE MIT
BEGLEITERN**
Neben Jupiter
sind seine
Monde Io und
Europa klein
zu erkennen.

SCHATTENWURF Auf dieser Aufnahme der Raumsonde Juno, deren Farben durch Nachbearbeitung verstärkt wurden, verdunkelt der Mond Ganymed einen Teil von Jupiters Wolkendecke.



NASA/JPL-CALTECH/SWIRNSS - IMAGE PROCESSING: THOMAS TOROPOLUS (PICTOJOURNAL.FR, NASA.GOV/CATALOG/PAGE28151), CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS, DRUGLICENSES/PA/4/IE/GALDREI)

University Applied Physics Laboratory, die den US-Antrag mitverantwortete. »Damit war der Besuch bei Europa abgesagt.« Das war enttäuschend, kam aber nicht völlig unerwartet.

2013 unterstützte der US-Kongress die NASA dann wieder bei ihren Bemühungen um eine Erforschung Europas. Der ursprünglich als Europa Multiple Flyby Mission bezeichnete US-amerikanische Teil des Projekts wurde zu Europa Clipper umgetauft, angelehnt an die Bezeichnung für schnelle Frachtsegler aus dem 19. Jahrhundert. Das belebte die internationale Zusammenarbeit wieder, allerdings »in viel kleinerem Umfang«, so Prockter. Die Forscherin hält dennoch etwa 70 Prozent der ursprünglichen gemeinsamen Pläne weiterhin für umsetzbar.

Das Mini-Sonnensystem nebenan

Mit beiden Missionen wird sich unser Wissen über Jupiter und seine Monde erheblich erweitern. Die Raumsonden sollen Aufschluss darüber geben, ob in den verborgenen Ozeanen grundsätzlich Leben existieren könnte. Das dürfte den Grundstein für spätere Missionen legen, die direkte Nachweise erbringen und dabei womöglich sogar in die Ozeane selbst vordringen könnten. Zwar können wir noch nicht zu fremden Welten um andere Sterne reisen,

aber ein Abstecher zu Jupiters Monden kommt dem schon ziemlich nahe.

Schließlich gilt das Jupitersystem wegen seiner Komplexität und Vielfalt oft als eine Art Miniaturversion des Sonnensystems. Die vier größten Monde heißen auch »galileisch«, benannt nach ihrem Entdecker, dem italienischen Astronomen Galileo Galilei. 1610 erschütterten dessen Beobachtungen das damals geozentrische Weltbild, da die Monde anders als alle bis dahin bekannten Objekte weder die Sonne noch die Erde umkreisten. Heute kennt man mehr als 90 Trabanten von Jupiter.

Als erster menschengemachter Flugkörper drang die NASA-Raumsonde Pioneer 10 in Jupiters Reich vor. Sie passierte den Gasriesen im Dezember 1973 und lieferte Nahaufnahmen. Die ebenfalls vorbeischießenden Sonden der Voyager-Mission erbrachten 1979 dann Bilder vom Mond Europa mit einer überraschend glatten, kraterfreien Oberfläche (siehe »Spektrum« November 2022, S. 12). Offenbar erneuern Umformungsprozesse die Kruste ständig. Das führte bereits damals zu der Hypothese, unter dem Eis existiere ein unsichtbares Reservoir aus flüssigem Wasser.

Im Dezember 1995 blieb im Rahmen der NASA-Mission Galileo endlich ein irdischer Späher länger bei Jupiter, umkreiste ihn und machte dabei zahlreiche Entdeckun-



GANYMED 2021 stattete die NASA-Sonde Juno dem größten Mond des Sonnensystems einen Besuch ab und fotografierte Einschlagkrater und Verwerfungen auf seiner Oberfläche.

gen. Die Daten wiesen etwa auf Unregelmäßigkeiten von Jupiters Magnetfeld hin, die zu Störungen durch einen flüssigen Ozean unter der Oberfläche von Europa passen würden. Ein noch eindeutigerer Beleg für die These kam 2013 mit Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble, die austretende Wasserfontänen zeigten. Solche Phänomene waren etwa schon vom Saturnmond Enceladus bekannt. Die Galileo-Mission dauerte bis 2003 und war laut ESA-Wissenschaftler Olivier Witasse insgesamt »fantastisch«. Für die JUICE-Mission, an der er beteiligt ist, wünscht er sich, dass sie in Galileos Fußstapfen treten wird.

Vorerst umkreiste dann keine andere Sonde mehr Jupiter – bis zur Ankunft der NASA-Raumsonde Juno 2016. Juno ist noch immer in Betrieb, konzentriert sich aber auf den Planeten selbst und sein Inneres, seine heftigen Stürme und das starke Magnetfeld. Juno hat zwar ebenfalls Bilder von Jupiters Monden aufgenommen, doch es bedarf spezialisierter Missionen, um deren Geheimnisse zu entschlüsseln. Hier kommen JUICE und Clipper ins Spiel.

Clipper soll im Herbst 2024 an Bord der SpaceX-Rakete Falcon Heavy starten. Trotz des im Vergleich zu JUICE späteren Termins ermöglicht es die leistungsstärkere Trägerrakete, Jupiter bereits ein Jahr vorher zu erreichen, nämlich 2030. Clipper wird nicht in einen Orbit um Europa

einschwenken, da sich der Mond gefährlich tief in Jupiters Strahlungsgürtel voller energiereicher Teilchen befindet. Stattdessen wird Clipper etwa 50 Vorbeiflüge durchführen, das Innere des Mondes kartieren und die Ausdehnung des verborgenen Ozeans bestimmen. »Ein Orbiter um Europa würde wegen der Strahlung nur ein bis drei Monate durchhalten«, erläutert Missionswissenschaftler Curt Niebur von der NASA. »Wir haben erkannt, dass es sinnvoller ist, stattdessen während eines kurzen Vorbeiflugs Daten zu sammeln und sich dann schnell wieder in Regionen mit geringerer Belastung zurückzuziehen. Auf die Weise können die Geräte Jahre überstehen statt bloß Monate.«

Im Lauf ihrer sich überschneidenden Missionen werden JUICE und Clipper einen eng aufeinander abgestimmten Tango vollführen. Während sie zwischen Jupiters Sehenswürdigkeiten hin- und herziehen, ergeben sich zahlreiche Gelegenheiten zur Zusammenarbeit. »Es wird großartig sein, zwei Raumsonden im selben System zu haben«, hofft Witasse. Etwa 20 Teammitglieder beider Missionen treffen sich wöchentlich im Rahmen eines gemeinsamen Lenkungs Ausschusses und entwickeln Ideen für choreografierte Untersuchungen. »Wir erörtern die wissenschaftlichen Möglichkeiten und arbeiten Pläne aus«, erklärt Emma Bunce, die gemeinsam mit Louise

NASA/JPL-CALTECH/SVR/MSS/KALEHEIKI KANNISTO (PHOTOJOURNAL.JPL.NASA.GOV/CATALOG/PNC2021/CE BY 4.0/CREATIVECOMMONS/ORG/licenses/by/4.0/E/GALODIE)

Prockter dem Ausschuss vorsitzt. Zwar seien »einige Details ein wenig anders« als bei der ursprünglichen EJSM-Zusammenarbeit, dennoch bleibe die eigentliche Vision erhalten: »Der ursprüngliche Plan war eine Mission zu Ganymed und eine weitere, die sich auf Europa konzentriert. Genau das bekommen wir.«

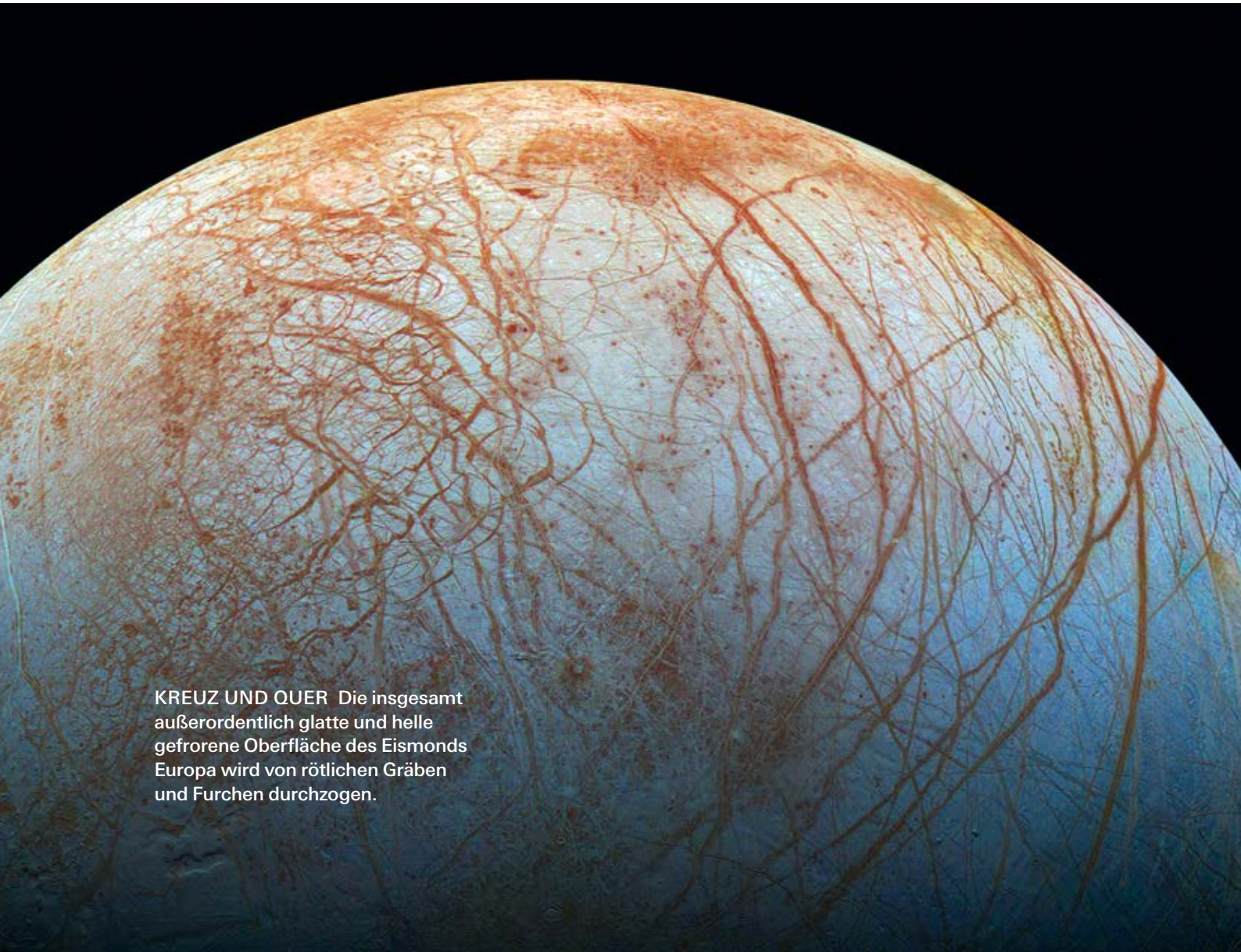
Gemeinsam zu Europas Geheimnissen

Beispielsweise könnte jede Raumsonde als Kundschafterin für die andere fungieren. Während etwa JUICE Europa aus der Ferne beobachtet, würde Clipper die Daten für die Vorbereitung eines nahen Vorbeiflugs nutzen. So eine Partnerschaft wäre besonders wertvoll, falls währenddessen tatsächlich Wasserfontänen aus Rissen im Eis sprühten. Das könnte laut Mark Fox-Powell einen Blick auf nur wenige Minuten alte ozeanische Auswürfe gewähren – »eine Chance, unveränderte Stoffe zu untersuchen«. Mit Glück könnte Clipper direkt hindurchfliegen und die Fontänen beproben. Komplexe Moleküle wären erste Hinweise auf mögliches Leben in Europas Ozean.

JUICE wird auf dem Weg zu Ganymed zweimal selbst an Europa vorbeifliegen. Eine Ankunft im Juli 2032 soll

nur um vier Stunden gegenüber einer Clipper-Passage versetzt sein. »Wir können zur selben Zeit ähnliche Messungen durchführen«, erwartet Witasse. Genaue Details stehen allerdings noch nicht fest. »Wir sind dann zwar nicht am gleichen Ort, aber es wird trotzdem sehr interessant«, fügt er hinzu. »Wir würden vergleichbare Strukturen an der Oberfläche fotografieren oder im Fall einer Fontäne diese aus mehreren Perspektiven sehen.«

Das gemeinsame Interesse an Europa beruht zum Teil auf der Vermutung, dass sein flüssiger Ozean in direktem Kontakt mit einem festen Gesteinskern steht. Dort könnte es hydrothermale Schlote geben. Aus solchen Öffnungen im Meeresboden kann Wärme aus der Tiefe entweichen und ausreichend Energie und Nährstoffe für Organismen liefern. »Auf der Erde gibt es bei hydrothermalen Quellen ganze Lebensgemeinschaften«, erklärt Fox-Powell. »Wir haben guten Grund zu der Annahme, dass auf Europa ähnliche Arten von chemischen Reaktionen ablaufen.« Bei Ganymed hingegen könnten sich wegen seiner enormen Masse bestimmte Eismodifikationen mit hoher Dichte am Boden des Ozeans befinden. So eine Schicht verstopft eventuell etwaige Öffnungen. »Das würde den felsigen



KREUZ UND QUER Die insgesamt außerordentlich glatte und helle gefrorene Oberfläche des Eismonds Europa wird von rötlichen Gräben und Furchen durchzogen.

Kern abdichten«, sagt Fox-Powell. »Europa kann mit seiner geringeren Größe nicht genügend Schwerkraft für derartiges Hochdruckeis aufbauen.«

Trotzdem könnte Ganymed ebenfalls lebensfreundlich sein. 2034 wird JUICE nach dem Eintritt in eine Umlaufbahn die gesamte Oberfläche kartieren, das Magnetfeld des Monds untersuchen und die inneren Schichten vermessen. Die vier Grundvoraussetzungen für eine lebensfreundliche Umgebung sind laut Michele Dougherty vom Imperial College London »eine Wärmequelle, flüssiges Wasser, organisches Material und stabile Verhältnisse«. Drei der Kriterien sind der Wissenschaftlerin zufolge bei Enceladus erfüllt. Ebenso bei Europa. »Und bei Ganymed versuchen wir noch, es herauszufinden.«



NASA / STS-130 CREW MEMBER

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

JUICE beginnt seine Untersuchungen in einer Umlaufbahn 5000 Kilometer über Ganymed und wird im Verlauf von neun Monaten seine Höhe auf nur 200 Kilometer über der Oberfläche verringern. Am Ende der Mission im Jahr 2035 soll die Raumsonde gezielt auf den Mond stürzen und so das Risiko einer Kontamination Europas minimieren. Dieses Vorgehen basiert auf den Annahmen, dass es auf Ganymed keine Wasserfontänen gibt und die Eiskruste dick genug ist, um den Aufprall zu überstehen. Sollte es anders sein und die Gefahr einer Verunreinigung des flüssigen Ozeans mit irdischem Material bestehen, müsste das Missionsende umgeplant werden. »Wenn irgendetwas auf eine Verbindung zwischen dem Ozean und der Oberfläche hinweist, passen wir vielleicht die Umlaufbahn an«, so JUICE-Projektleiter Giuseppe Sarri von der ESA.

Langer Atem und frühzeitige Planung

In ähnlichem Umfang wie bei JUICE und Ganymed wird Clipper das Wissen über Europa und dessen Ozean erweitern. Belege für etwaiges Leben dürfen wir jedoch noch nicht erwarten, bestenfalls die Identifizierung entsprechender chemischer Bausteine in ausgestoßenen Wasserfahnen. Die gezielte Suche nach Organismen wäre dann das Ziel einer späteren Mission, etwa des von der NASA angestrebten »Europa Lander«. Ein entsprechendes Konzept wurde bereits ausgearbeitet, eine Umsetzung aber noch nicht finanziert. Unter den verschiedenen interplanetaren Forschungsvorhaben der USA wird die Europa-Lander-Mission von den US-Wissenschaftsakademien als weniger wichtig eingestuft. So ruhen die

geleiteten Vorarbeiten und harren der Wiederaufnahme. »Ich bin zuversichtlich, dass die mit Europa Clipper gewonnenen Erkenntnisse uns zu den Plänen zurückkehren lassen. Eine Landesonde wirkt wie der logische nächste Schritt«, meint Curt Niebur. »Doch eventuell wird uns Clipper auch einen Strich durch die Rechnung machen, und ein Lander entpuppt sich als der falsche Weg. Unter Umständen ist es lohnenswerter, durch die Fontänen zu kreuzen.«

Will man tatsächlich in diesen fremdartigen Ozean vordringen, wird das Durchbrechen des kilometerdicken Eisschilds eine große Herausforderung sein. Eine Möglichkeit dazu böte eine heiße Sonde am Lander, die sich allmählich ihren Weg durch die gefrorene Kruste bahnt. Die Raumfahrt-Ingenieurin Paula do Vale Pereira vom Florida Institute of Technology hat mit einem Experiment versucht, herauszufinden, wie lange das dauern könnte. Dazu verwendete sie eine zwei Meter hohe Säule aus Eis, die im Vakuum auf unter minus 180 Grad Celsius gekühlt wurde. Das sollte die Oberfläche von Europa simulieren. Ihre Ergebnisse, die sie im Januar 2023 auf einer Tagung der American Astronomical Society in Seattle vorstellte, waren ernüchternd: Das Vorhaben könnte zwischen 3 und 13 Jahre benötigen.

Es gibt aber auch noch größere Herausforderungen als die Wartezeit. »Ein riesiges Problem, das in der nächsten Zeit gelöst werden muss, ist die Frage, wie Kabel zwischen dem Lander und der Sonde Strom und Daten übertragen können«, erläutert do Vale Pereira. Die Landeeinheit müsste mehrere Kilometer lange Drähte mit sich führen, die keinen Schaden nehmen dürfen, selbst wenn das Wasser während des Abstiegs der Sonde wieder gefriert. Das allein ist eine Mammutaufgabe, deren Bewältigung allerdings einen enormen wissenschaftlichen Ertrag verspricht – geht es doch immerhin darum, in einen außerirdischen Ozean vorzustoßen.

Noch auf Jahre hinaus werden das Träume bleiben. Vor deren Erfüllung stehen die Reise zum Jupiter und die Bestätigung, dass seine eisigen Monde wirklich so viel versprechende Ziele sind wie gedacht. Mit JUICE und Clipper werden sich einige der spannendsten offenen Fragen beantworten lassen. Die Galileo-Sonde habe gezeigt, so Niebur, wie lohnenswert eine erneute Reise in das Jupitersystem sei. Jetzt entsendet die Menschheit nicht nur eine, sondern gleich zwei Raumsonden. Die transatlantische Partnerschaft wird die Suche nach lebensfreundlichen Orten im Sonnensystem erheblich voranbringen. In unserer solaren Nachbarschaft gibt es zwar keine zweite Erde, aber möglicherweise boten Europa oder sogar Ganymed ebenfalls Gelegenheiten für die Entwicklung von Leben. Und wenn es dort existiert – wer weiß, wo im All es sonst noch entstanden ist? ◀

QUELLE

Do Vale Pereira, P. et al.: Experimental validation of cryobot thermal models for the exploration of ocean worlds. The Planetary Science Journal 4, 2023

Fremdartige Ozeane

Sechs Monde von Planeten des äußeren Sonnensystems könnten große Mengen flüssigen Wassers beherbergen. Wir stellen die Himmelskörper in Grafiken vor.

» spektrum.de/artikel/2150664



Rebecca Boyle ist Journalistin in Colorado und Autorin eines Buchs über die Bedeutung des Erdmonds für unseren Planeten. Die Grafiken stammen von Juan Velasco, der sich auf Datenvisualisierung spezialisiert hat.

2005 durchstieß die Raumsonde Cassini auf ihrem Weg durch das Saturnsystem etwas, mit dem niemand gerechnet hatte: Wasserdampf. Er sprühte mit rund 1300 Kilometern pro Stunde aus Rissen in der Kruste des von Eis bedeckten Monats Enceladus. Die Entdeckung beflügelte dazu, Missionen zu den Monden im äußeren Sonnensystem zu planen. Mindestens sechs von diesen – drei davon bei Jupiter, zwei bei Saturn und einer in Neptuns Orbit – könnten nach heutigem Wissen Ozeane mit flüssigem Wasser beherbergen, irgendwo in Schichten zwischen dem warmen Kern und der eisigen Kruste der Himmelskörper.

Auf der Erde ist Wasser die Grundvoraussetzung für, so heißt es oft, »Leben, wie wir es kennen«. Einmal abgesehen von unserem Nachbarplaneten Mars, dessen Dünen die Menschheit seit einem halben Jahrhundert erkundet, zählen die vereisten Monde der äußeren Planeten zu den vielversprechendsten Kandidaten auf der Suche nach Spuren von vergangenem oder gegenwärtigem nicht irdischem Leben im Sonnensystem.

Die europäische Raumsonde JUICE ist im April 2023 zum Gasriesen Jupiter und zu dessen Eismonden Europa, Kallisto und Ganymed aufgebrochen. 2024 wird die US-amerikanische Sonde Europa Clipper folgen. Gemeinsam dürften sie unser Wissen über das äußere Sonnensystem drastisch erweitern. Vielleicht verrücken sie unsere kosmische Perspektive sogar auf ähnlich revolutionäre Weise wie die Entdeckung dieser Monde im 17. Jahrhundert das geozentrische Weltbild stürzen ließ.

»Im äußeren Sonnensystem tummeln sich vermutlich etliche Monde mit möglichen Ozeanen aus flüssigem Wasser, an deren Grund es teilweise Wechselwirkungen mit thermalen Quellen oder dem Gestein geben könnte«, erläutert der Geophysiker Chris German von der Woods

Hole Oceanographic Institution im US-Staat Massachusetts. Er gehört zum vierköpfigen Leitungsteam eines Astrobiologie-Forschungsnetzwerks der NASA namens Network for Ocean Worlds. »Überall dort, wo solche Bedingungen auf der Erde vorkommen, lassen sich Mikroben nieder.«

Und so könnte es Leben im halb gefrorenen Schneematch auf Europa und Enceladus geben, in Ganymeds tiefen Salzwasserschichten, unter den Methan- und Ethanflüssen auf Titan und eventuell sogar in der konzentrierten Sole in den tiefsten Kratern der Zwergplaneten Ceres und Pluto. Auf der Erde wimmeln Mikroorganismen selbst unter dem kilometerdicken grönländischen Eisschild. Chemische Reaktionen oder geologische Vorgänge liefern die Energie für die biologischen Prozesse. Dasselbe Prinzip findet sich bei hydrothermalen Schloten in der Tiefsee. NASA-Astrobiologe Steve Vance meint: »Egal, welches Szenario man für die Entstehung von Leben auf der Erde bevorzugt, es hätte ebenso gut auf Europa ablaufen können.« So dürften dann auch die gleichen Techniken, mit denen sich irdische extremophile Organismen untersuchen lassen, Einblicke in etwaiges Leben auf fernen Himmelskörpern gewähren.

Neben dem genannten Woods Hole sind in das Network for Ocean Worlds Fachleute aus dem Southwest Research Institute im texanischen San Antonio, aus dem Desert Research Institute aus Reno in Nevada und der kalifornischen Stanford University eingebunden. Im August 2023 kommen alle in Kalifornien zu einem Austausch zusammen. Expertise aus verschiedenen Bereichen wird sich unter dem gemeinsamen Ziel vereinen: der Suche nach Leben. Beispielsweise stellte sich die Mikrobiologin Alison Murray vom Desert Research Institute zum ersten Mal die Frage nach Organismen auf fernen Monden, als sie den Salzsee Lake Vida in der Antarktis untersuchte. Sie betont, nur auf Basis von Erfahrungen mit irdischen Gewässern ließen sich potenzielle Nischen anderswo im Sonnensystem verstehen. »Wir stoßen in Regionen vor, von denen wir glauben, dort könnte Leben vorkommen«, sagt sie. »Aber hat es sich dort entwickelt? Ist es dorthin vorgedrungen?« Will man den Weg des Lebens nachvollziehen, muss man ihm hinterhertauchen.

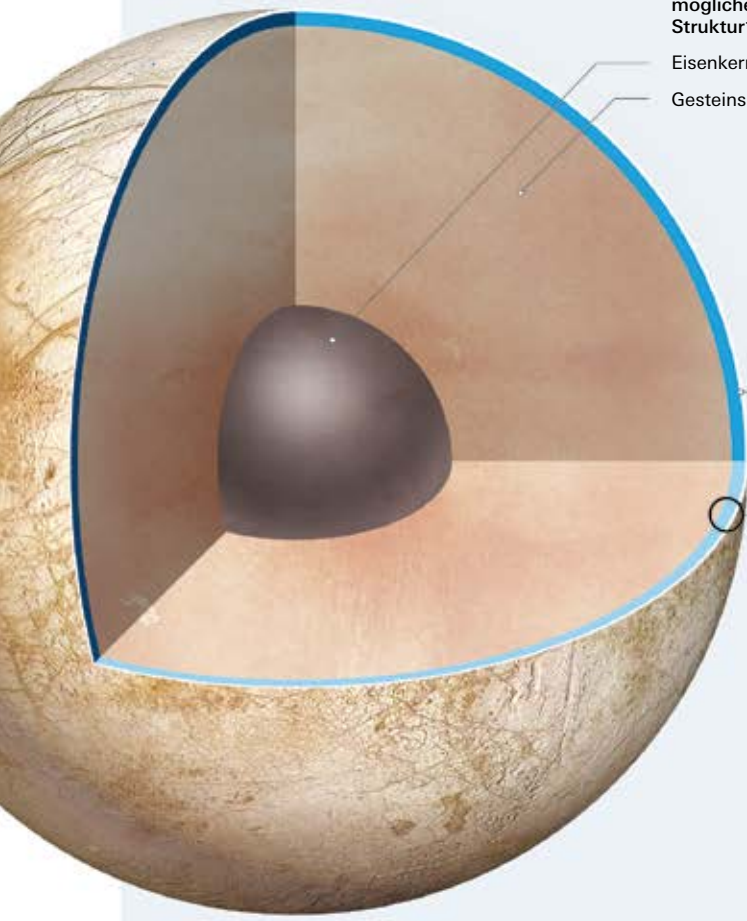


Jupitermond

Europa

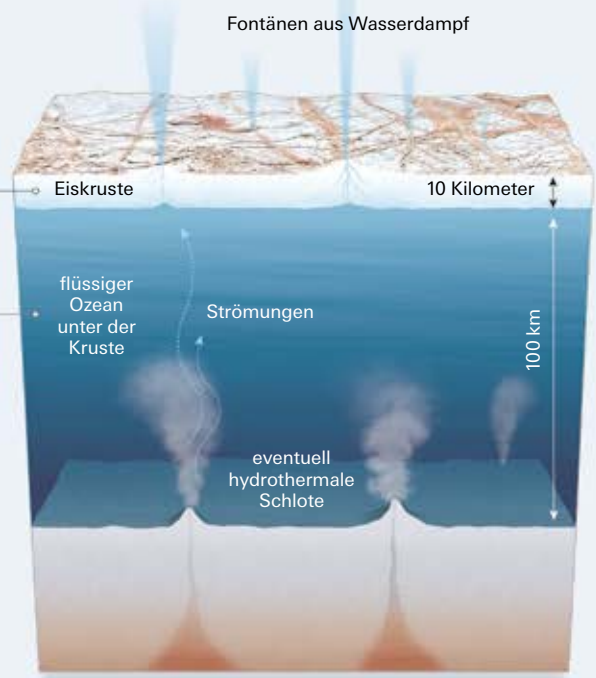
starke Hinweise:
flüssiger Salzwasser-Ozean
unter der Kruste

Daten, die um die Jahrtausendwende von der Raumsonde Galileo gemessen wurden, zeigten Wechselwirkungen von Jupiters Magnetfeld mit dem Mond, die sich durch flüssiges Salzwasser erklären lassen. Außerdem schießen Fontänen 160 Kilometer hoch ins All, wahrscheinlich aus Rissen in der Kruste. Diese ist insgesamt relativ glatt. Offenbar wird sie von inneren Prozessen regelmäßig umgestaltet.



mögliche Struktur*:
Eisenkern
Gesteinsmantel

Vermutlich treibt eine Hülle aus Eis auf einem dickflüssigen Ozean. Der Meeresgrund könnte von einer Hochdruckmodifikation von Eis bedeckt sein, dem so genannten Eis VII. Es bildet kubische statt hexagonale Kristallgitter. Hier läuft der Salztransport leichter ab, was chemische Reaktionen begünstigt.



Weiterhin offene Fragen

Bilder des Weltraumteleskops Hubble lieferten Hinweise auf Wasserfontänen. Die Raumsonde Europa Clipper kann mit ihrem Radar unter die Eiskruste blicken, mit einem Spektrometer Hinweise beispielsweise auf organische Moleküle und Ammoniak sammeln oder sogar Solebecken und Hochdruck-Eistypen am Meeresboden identifizieren.

Ozeanvolumen (in Milliarden km ³):	1,8	2,6
	Erde	Europa

entdeckt 1610 von Galileo Galilei

Durchmesser: 3130 km
 Oberflächentemperatur: -170 °C

Erdmond (3475 km)

untersucht in den 1970er Jahren:
 Vorbeiflüge von Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1, Voyager 2 / 1996: Galileo

geplante Missionen:
 Start im April 2023: JUICE
 Start 2024: Europa Clipper

5W INFODIAGRAMMS: EUROPA: NASA VISUALIZATION TECHNOLOGY APPLICATIONS AND DEVELOPMENT (VAD); EUROPA-OBERFLÄCHE: NASA/JPL/CALTECH/SETI INSTITUTE / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2023; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

*Schichtdicke nicht maßstabsgetreu

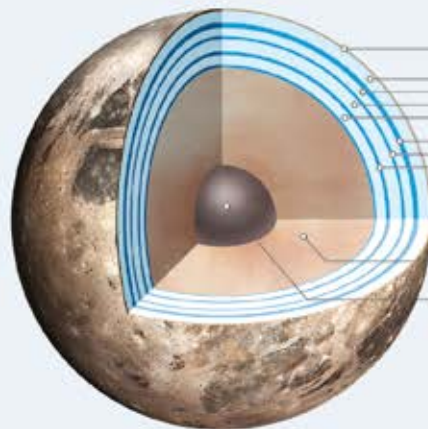


Jupitermond

Ganymed

starke Hinweise:
flüssiger Salzwasser-Ozean
unter der Kruste

Innerhalb des größten Mondes des Sonnensystems schichten sich womöglich mehrere Lagen aus Gestein, Wasser und exotischen Hochdruckmodifikationen von Eis. Auf der Erde erlauben Wechselwirkungen zwischen Wasser und Gestein eine große Vielfalt von Mikroorganismen. Als einziger bekannter Mond besitzt Ganymed ein eigenes Magnetfeld. Es verursacht Polarlichter, deren Bewegung von Fluktuationen von Jupiters Magnetfeld abhängt und die Rückschlüsse auf einen Ozean im Inneren zulassen.



mögliche Struktur*:

- Kruste aus Eis und Gestein
- Eisschichten
- Ozeanschichten, mit zunehmender Tiefe salzreicher
- Gesteinsmantel
- Eisenkern

Ozeanvolumen (in Milliarden km³):

1,8

37,8

Erde Ganymed

Weiterhin offene Fragen

Ganymed ist Hauptziel der JUICE-Mission. Die Raumsonde soll klären, woher der Mond sein Magnetfeld erhält, und die Dynamik der Polarlichter untersuchen.

entdeckt 1610 von Galileo Galilei

Durchmesser: 5262 km
Oberflächentemperatur: -200 bis -120 °C



Erdmond

untersucht in den 1970er Jahren: Vorbeiflüge von Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1, Voyager 2 / 1996: Galileo / 2000: Cassini / 2021: Juno

geplante Missionen: Start im April 2023: JUICE

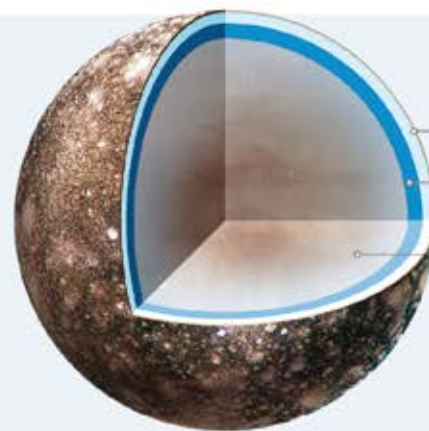


Jupitermond

Kallisto

potenziell:
flüssiger Ozean unter
der Kruste

Unter Jupiters Monden hat dieser die geringste Dichte. Kallisto umkreist den Planeten in 1,8 Millionen Kilometer Entfernung und damit weit weg von Jupiters intensiven Strahlungsgürteln. Hier erfährt der Mond auch deutlich weniger Gezeitenkräfte. Seine geologische Aktivität endete wohl bereits kurz nach seiner Entstehung. Die mit Kratern übersäte Oberfläche konserviert somit Zeugnisse aus dem frühen Sonnensystem.



mögliche Struktur*:

- Eiskruste
- Ozean
- Eis-Gestein-Gemisch

Ozeanvolumen (in Milliarden km³):

1,8

4,8

Erde Kallisto

Weiterhin offene Fragen

Es ist umstritten, ob Kallisto überhaupt einen Ozean aus Salzwasser verbirgt und wie tief dieser wäre. Für eine eindeutige Antwort soll JUICE die Form des Mondes und dessen Schwerefeld vermessen.

entdeckt 1610 von Galileo Galilei

Durchmesser: 4820 km
Oberflächentemperatur: -140 °C



Erdmond

untersucht in den 1970er Jahren: Vorbeiflüge von Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1, Voyager 2 / 1996: Galileo

geplante Missionen: Start im April 2023: JUICE

SW INEERGRAPHICS, GANYMED: NASA VISUALIZATION TECHNOLOGY APPLICATIONS AND DEVELOPMENT (VTAAD); KALLISTO: NASA JPL/DIR / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2022; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

*Schichtdicke nicht maßstabsgetreu

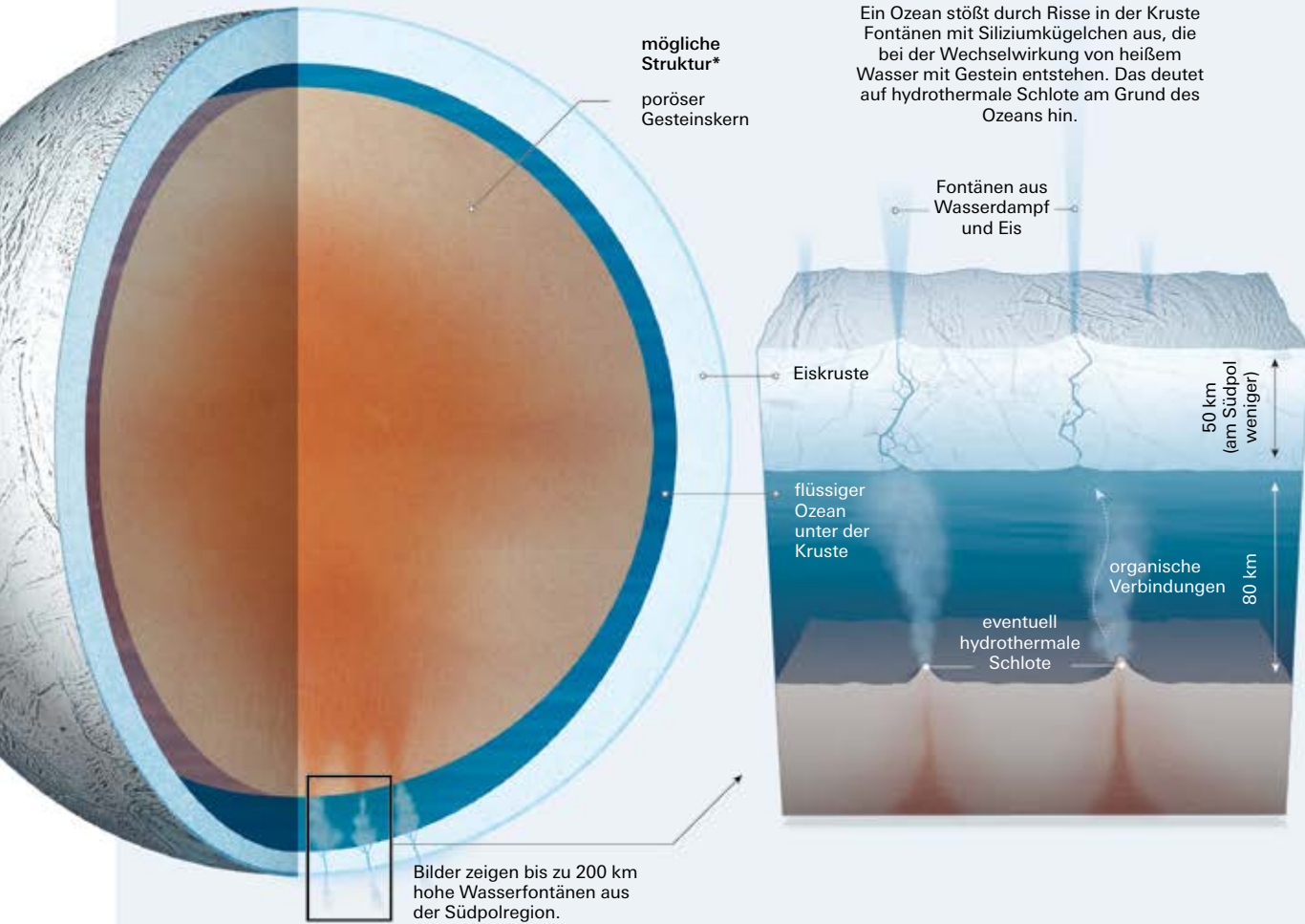


Saturnmond

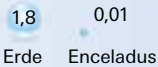
Enceladus

starke Hinweise:
flüssiger Salzwasser-Ozean
unter der Kruste

Dank seiner Kruste aus frischem Eis ist der kleine Mond einer der am stärksten reflektierenden Himmelskörper. Der Nachschub an Kristallen stammt aus Fontänen, die ständig aus der Oberfläche schießen. Deren glatte Struktur deutet wie bei Europa auf geologische Aktivität hin. Die Fontänen speisen den E-Ring des Saturns und könnten molekulare Spuren etwaigen Lebens enthalten. Im Ozean dürften reichlich Phosphate vorkommen, die zumindest für irdische Organismen wichtig sind.



Ozeanvolumen (in Milliarden km³):



Weiterhin offene Fragen

Die genaue Größe des Ozeans ist unbekannt, aber seine Zusammensetzung lässt sich immerhin sehr gut anhand des Materials in den Fontänen sowie im E-Ring untersuchen.

entdeckt 1789 von William Herschel

Durchmesser: 504 km
 Oberflächentemperatur: -200 °C

Erdmond

untersucht 1980/1981: Vorbeiflüge von Voyager 1/2 / 2005: Cassini

geplante Missionen: Das von der NASA vorgeschlagene Konzept Enceladus Orbilander sieht vor, den Mond zu umrunden und eine Sonde abzusetzen

SW INFOGRAPHICS: ENCELADUS: NASA, JPL, CALTECH / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2023; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

*Schichtdicke nicht maßstabsgetreu

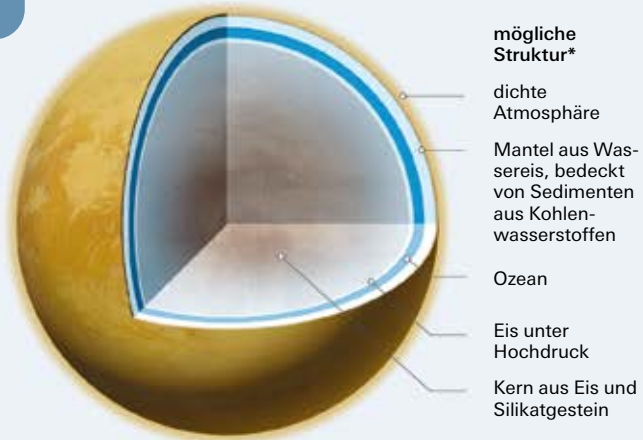


Saturnmond

Titan

starke Hinweise:
flüssiger Ozean unter
der Kruste

Die europäische Landesonde Huygens fand vielfältige Landschaftsformationen vor, die äußerlich jenen auf der Erde ähneln – aber aus Eis bestehen. Titans dichte Atmosphäre enthält hauptsächlich Stickstoff, jedoch keinen Sauerstoff wie die irdische. Große Mengen von Methan und Ethan, die ähnlich zirkulieren wie Wasser auf der Erde, hüllen den Mond in einen orangenen Dunst.



mögliche Struktur*

dichte Atmosphäre

Mantel aus Wassereis, bedeckt von Sedimenten aus Kohlenwasserstoffen

Ozean

Eis unter Hochdruck

Kern aus Eis und Silikatgestein

Ozeanvolumen
(in Milliarden km³)

1,8

17,0

Erde Titan

Weiterhin offene Fragen

Sonnenlicht spaltet mit der Zeit Methanmoleküle. Warum gibt es hier dennoch so viel davon? Eine Hypothese: Kryovulkane speien fortlaufend Wasser und Kohlenwasserstoffe an die Oberfläche.

entdeckt
1655
von
Christiaan
Huygens

Durchmesser:
5152 km
Oberflächen-
temperatur:
-180 °C



Erdmond

untersucht 1980/1981:
Vorbeiflüge von Voyager 1/2 /
2005: Cassini-Huygens
(Vorbeiflüge der Cassini-,
Landung der Huygens-Sonde)

geplante Missionen:
Start 2027: NASA-
Sonde Dragonfly
(Ankunft 2034)

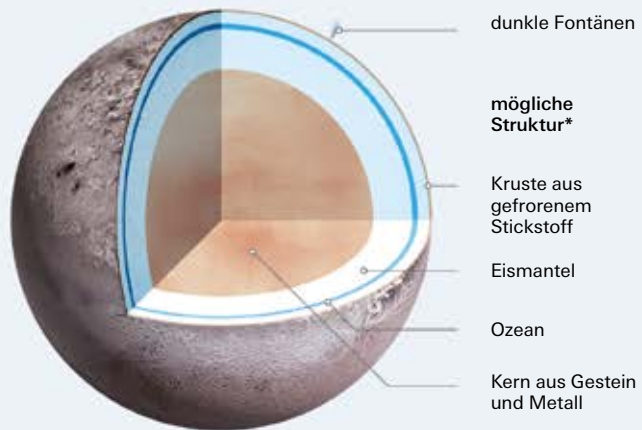


Neptunmond

Triton

hypothetisch:
flüssiger Ozean unter
der Kruste

Der größte Mond Neptuns umkreist seinen Planeten retrograd, das heißt entgegen dessen Rotationsrichtung. Er stammt wahrscheinlich wie Pluto aus dem weiter außen gelegenen Kuipergürtel und wurde von Neptuns Schwerkraft eingefangen. Dabei dürfte die drastische Veränderung seiner Bahn ihn stark aufgeheizt und eventuell sogar einen Ozean unter der Kruste angeschmolzen haben. Trotz der Entfernung von 4,5 Milliarden Kilometern zur Sonne trägt diese saisonal zur Erwärmung bei.



dunkle Fontänen

mögliche Struktur*

Kruste aus gefrorenem Stickstoff

Eismantel

Ozean

Kern aus Gestein und Metall

Ozeanvolumen
(in Milliarden km³):

1,8

0,03

Erde Triton

Weiterhin offene Fragen

Voyager 2 hat Phänomene erspäht, die Geysiren und Lavaflüssen ähneln, was für eine geologisch aktive Kruste mit einem Ozean darunter spricht. Doch das kann nur ein genauerer Blick bestätigen.

entdeckt
1846
von
William
Lassell

Durchmesser:
2704 km
Oberflächen-
temperatur:
-235 °C



Erdmond

untersucht 1989:
Vorbeiflug von
Voyager 2

geplante Missionen:
keine

5W INFOGRAPHICS; TITAN: NASA/JPL/CALTECH/UNIVERSITY OF MAMES; TRITON: NASA VISUALIZATION TECHNOLOGY APPLICATIONS AND DEVELOPMENT (VTAD) / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2003; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

*Schichtdicke nicht maßstabgetreu

FREMDARTIG
Niemand weiß, ob es
extraterrestrische
Lebewesen gibt und
welche Formen das
Leben überhaupt
annehmen kann.

AUF EINEN BLICK

Jenseits unserer Vorstellung

- 1** Extraterrestrisches Leben unterscheidet sich von irdischem möglicherweise so stark, dass wir Schwierigkeiten hätten, es überhaupt als »lebendig« zu erkennen.
- 2** Die Suche nach Aliens setzt daher voraus, allgemeine Kriterien zu finden, die zwischen Leben und Nichtleben unterscheiden helfen.
- 3** Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet liefern erste Ansätze – etwa die Messung von Komplexität, Konzentrationsgefällen und Ungleichgewichtszuständen.

Leben auf anderen Welten

Gibt es Außerirdische? Wenn wir nach Antworten darauf suchen, sollten wir uns klarmachen, dass Aliens völlig anders beschaffen sein könnten als alles, was wir von der Erde kennen.

» spektrum.de/artikel/2150667

Sarah Scoles ist Wissenschaftsjournalistin in Colorado, USA. Sie hat mehrere Bücher zum Thema außerirdisches Leben verfasst.



► Sarah Stewart Johnson war im zweiten Jahr ihres Studiums, als sie zum ersten Mal den Vulkan Mauna Kea in Hawaii erklomm. Dessen Oberfläche aus erstarrter Lava unterschied sich frappierend von den baumbewachsenen Hügeln ihres Heimatstaats Kentucky. Johnson entfernte sich von der Gruppe junger Wissenschaftler, mit der sie unterwegs war, und ging auf einen Kamm unweit des 4205 Meter hohen Gipfels zu. Als sie nach unten blickte, drehte sie mit der Spitze ihres Stiefels einen Stein um. Zu ihrer Überraschung gedieh darunter ein winziger Farn, der aus der Asche und Schlacke spross.

Schlagartig wurde Johnson bewusst: Selbst eine Umgebung, die aus menschlicher Sicht äußerst fremd und widrig erscheint, kann Lebewesen eine Heimat bieten. Unweigerlich fragte sie sich, was das für die Vielfalt der extraterrestrischen Organismen bedeutet, die

möglicherweise jenseits der Erdatmosphäre existieren. In jenem Moment begann der Wunsch in ihr zu keimen, nach außerirdischem Leben zu fahnden.

Johnson machte diese Leidenschaft später zu ihrem Beruf. Als Astronomie-Postdoc an der Harvard University untersuchte sie in den frühen 2010er Jahren, wie das Analysieren von Nukleinsäuren – beispielsweise DNA und RNA – dabei helfen könnte, Aliens aufzuspüren. Sie fand die Arbeit faszinierend, fragte sich zugleich aber: Was wäre, wenn Außerirdische weder DNA, RNA noch sonstige Nukleinsäuren besäßen? Was wäre, wenn extraterrestrische Organismen ihre Erbinformation über völlig andere Moleküle an die Nachkommen weitergeben?

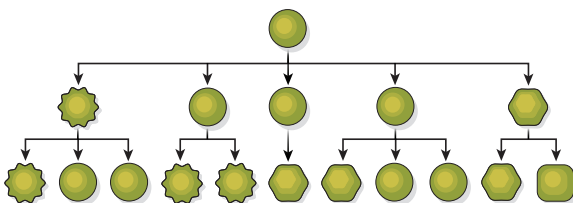
Die Forscherin begann, ihre Gedanken dazu aufzuschreiben – zunächst in lyrischer und philosophischer Form, was in das populärwissenschaftliche Buch »The Sirens of Mars« (erschienen 2020) mündete. Darin geht Johnson der These nach, dass andere belebte Planeten sich fundamental von der Erde unterscheiden könnten und somit auch deren jeweilige Bewohner und ihre (Bio-) Chemie. Diesen Überlegungen zufolge könnten unsere derzeitigen Verfahren, nach Außerirdischen zu suchen, zum Scheitern verurteilt sein. »Wir ähneln dem Mann, der nachts seinen Schlüssel verliert und als Erstes unter der Straßenlaterne nachsieht, weil es da halt hell ist«, sagt Johnson, die heute als außerordentliche Professorin an der Georgetown University arbeitet. Soll heißen: Wenn wir nach extraterrestrischem Leben ausschauen, nehmen wir Orte unter die Lupe, von denen wir aus eigener Erfahrung wissen, dass es dort Leben geben kann. Nämlich solche, die der Erde ähneln.

Suche nach anderer Biochemie

Ein Großteil der heutigen astrobiologischen Forschungsarbeiten konzentriert sich auf chemische »Biosignaturen«, Moleküle oder Stoffkombinationen, die auf das Vorhandensein von Leben hindeuten. Da niemand weiß, ob außerirdische und irdische Organismen eine vergleichbare Chemie aufweisen, könnte die Suche nach Biosignaturen dazu führen, dass wir Lebewesen übersehen, die uns quasi direkt auf der Nase sitzen. Johnson und viele weitere Forscherinnen und Forscher plädieren deshalb dafür, flexiblere Methoden anzuwenden, mit denen sich auch Lebensformen anderer Biochemie aufspüren lassen.

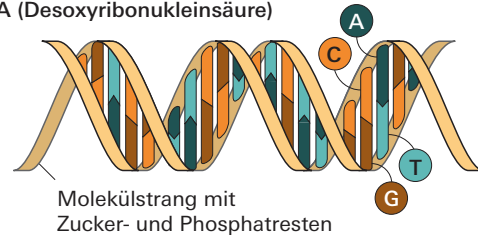
1 VERMEHRUNG UND VARIATION Leben, wie wir es kennen, reproduziert sich selbst – wobei Nachfahren mit veränderten Merkmalen entstehen.

Vervielfältigung mit Abweichungen



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2023; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DNA (Desoxyribonukleinsäure)



2 TRÄGER DER ERBINFORMATION Die DNA besteht aus zwei spiralförmig verdrehten Molekülsträngen, die abwechselnd Zucker- und Phosphatreste enthalten. An jeden Zucker ist eine Base geknüpft, bei der es sich entweder um Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C) oder Thymin (T) handelt.

Johnson bekommt jetzt die Chance dazu, und zwar als Leiterin einer neuen, von der NASA finanzierten Initiative namens Laboratory for Agnostic Biosignatures (Labor für agnostische Biosignaturen, LAB). Die daran beteiligten Fachleute setzen bei Außerirdischen keine bestimmte Chemie voraus und fahnden daher nicht nach spezifischen Signaturen. Stattdessen versuchen sie, allgemeinere und grundlegendere Marker für Leben heranzuziehen. Dazu gehören Hinweise auf Komplexität – etwa in Form von Stoffkombinationen, bei denen ein nicht biologischer Entstehungsmechanismus unwahrscheinlich ist. Ungleichgewichtszustände wie überraschend hohe Konzentrationen instabiler Substanzen können ebenfalls auf Leben hindeuten, selbst wenn es sich chemisch völlig anders zusammensetzt als das irdische.

Die Suche nach Außerirdischen fällt schon deshalb schwer, weil sich die Wissenschaftler nicht einig sind, was Leben überhaupt ist. Eine recht brauchbare Definition schlug 2011 der Genetiker Edward Trifonov vor, nachdem er mehr als 100 Begriffserklärungen zusammengetragen und daraus ein übergeordnetes Konzept abgeleitet hatte. Leben ist demnach »Selbstreproduktion mit Variationen«. Die NASA hatte schon Mitte der 1990er Jahre eine ähnliche Begriffsbestimmung erarbeitet, auf die sie noch heute zurückgreift. Ihr zufolge handelt es sich bei Leben um ein »sich selbst erhaltendes chemisches System, das zur darwinschen Evolution befähigt ist«. Keine dieser Definitionen erfordert eine bestimmte chemische Beschaffenheit. **1**

Auf der Erde nutzen etliche Lebewesen als Träger der Erbinformation die DNA. Sie besteht aus zwei spiralförmig verdrehten Molekülsträngen, die abwechselnd Zucker- und Phosphatreste enthalten. An jeden Zucker ist eine Base geknüpft, bei der es sich entweder um Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C) oder Thymin (T) handelt. Jeweils ein Basen-, Zucker- und Phosphatanteil zusammen bilden ein Nukleotid, einen DNA-Baustein. Die DNA gehört zu den so genannten Nukleinsäuren, zu denen auch die RNA zählt. Letztere ähnelt der DNA chemisch, unterscheidet sich von ihr aber unter anderem darin, dass sie die Base

JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2023; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Uracil statt Thymin enthält. RNA kann ebenfalls Erbinformation tragen, dient in komplexeren Lebewesen aber dazu, die auf der DNA gespeicherten Informationen an die zelluläre Proteinproduktion zu übermitteln. **2**

In der Abfolge der aneinandergereihten DNA-Nukleotide steckt die Bauanleitung, die erforderlich ist, um einen Organismus zu erzeugen. DNA kann sich vervielfältigen, und sie kann sich mit der aus einem anderen Organismus vermischen und so die Grundlage für eine neue Lebensform liefern, die sich dann ihrerseits repliziert. Würden Aliens auf anderen Planeten den gleichen biochemischen Apparat nutzen, wären sie uns molekular wohl recht ähnlich.

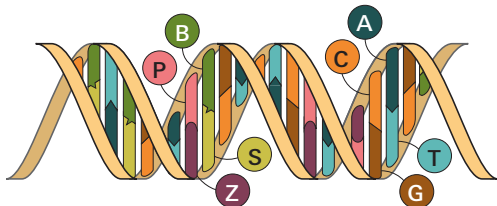
Man geht davon aus, dass jegliches Leben einen Mechanismus benötigt, um seinen eigenen Bauplan an die Nachkommen weiterzugeben. Veränderungen der Bauanleitung – ob zufällig oder gerichtet – können dann dazu beitragen, dass sich die entsprechenden Organismen im Lauf der Zeit weiterentwickeln. Möglicherweise transportieren Außerirdische diese Informationen auf anderen biochemischen Trägermolekülen als wir – etwa auf kugelförmigen Nukleinsäuren, wie sie ein Forschungsteam der Northwestern University (Illinois, USA) bereits in den 1990er Jahren hergestellt hat. Denkbar erscheint ebenso, dass extraterrestrisches Leben einen genetischen Code mit anderen Basen nutzt. Im Rahmen von NASA-geförderten Forschungsarbeiten haben Fachleute im Jahr 2019 eine synthetische DNA geschaffen, die neben den vier herkömmlichen Basen noch vier weitere enthält: P, Z, B und S.

Andere Forscher haben das molekulare Rückgrat der DNA verändert und dabei so genannte XNAs erzeugt, die statt der typischen Zuckerreste von DNAs Verbindungen wie Cyclohexen oder Glycol besitzen. Vielleicht gründen außerirdische Organismen aber ihre Chemie nicht einmal auf Kohlenstoff wie wir, sondern beispielsweise auf das funktionell ähnliche Silizium – was bedeuten würde, dass sie überhaupt keine Nukleinsäuren besäßen. Und das sind nur einige jener Möglichkeiten, die wir uns vorstellen können. Niemand weiß, was es da draußen alles gibt. **3**

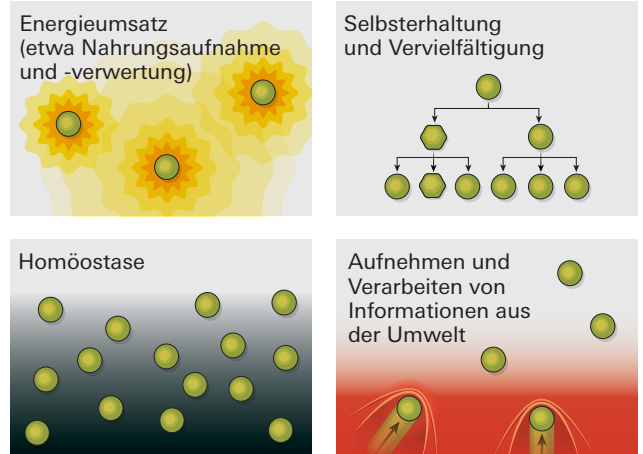
Leroy Cronin von der University of Glasgow, der in der LAB-Initiative mitarbeitet, ist sogar der Ansicht, wir

3 SYNTHETISCHE DNA Wissenschaftler haben künstliche DNA-Moleküle geschaffen, die neben den vier herkömmlichen Basen noch vier weitere enthalten: P, Z, B und S.

Künstliche DNA mit acht verschiedenen Basentypen



Vier Kriterien, die Lyfe erfüllen muss



4 LYFE Die Wortschöpfung »Lyfe« ist an »Life« (Leben) angelehnt, soll aber darüber hinausgehen. »Lyfe« ist demnach jeder Zustand, der alle folgenden Kriterien erfüllt: Energieumsatz; Selbsterhaltung und Vervielfältigung; Homöostase (Konstanterhaltung eines inneren Milieus); Informationsverarbeitung.

sollten den Begriff Biologie ganz vermeiden, wenn wir von Außerirdischen sprechen. Er meint, Biologie beruhe auf RNA, DNA, Proteinen und spezifischen Aminosäuren, und das seien Merkmale der irdischen Biosphäre. Laut Cronin wäre es richtiger, zu sagen: »Wir suchen nach Astroleben.«

Stuart Bartlett vom California Institute of Technology stimmt dem zu. Die Suche nach extraterrestrischen Organismen sei nicht zwangsläufig eine nach »Leben« gemäß unserem Verständnis. Es sei vielmehr eine Suche nach »Lyfe« – eine Wortschöpfung, die an »Life« (Leben) angelehnt ist und sich zugleich davon abgrenzt. Lyfe, so heißt es in einem einschlägigen Fachartikel, sei definiert als jeder Zustand, der alle vier folgenden Kriterien erfüllt: Energieumsatz, etwa in Form von Nahrungsaufnahme und Verdauung; sich selbst erhaltende chemische Reaktionen mit dem Ergebnis einer exponentiellen Vervielfältigung; das Aufrechterhalten eines inneren Milieus, während sich die äußeren Bedingungen ändern; und das Aufnehmen von Informationen aus der Umwelt, gefolgt von spezifischen Reaktionen darauf. »Leben«, steht in dem Fachbeitrag weiterhin geschrieben, »ist definiert als jene Lyfe-Variante, die wir von der Erde her kennen.« **4**

Von großem Interesse ist in diesem Zusammenhang, wie das Leben auf unserem Heimatplaneten einst entstand, wie also die biologischen Organismen aus einer unbelebten Umgebung hervorgegangen sind – ein Prozess namens Abiogenese. Es gibt zahlreiche Hypothesen dazu, die sich in zwei Hauptkonzepte untergliedern. Das eine besagt, am Anfang hätten katalytische RNA-Moleküle gestanden, die sowohl sich selbst (und die auf ihnen gespeicherte Information) vervielfältigten als auch andere

chemische Reaktionen beschleunigten. Aus dieser RNA seien nach und nach Lebewesen hervorgegangen, deren Bauplan im genetischen Code verschlüsselt war. Das andere Konzept geht von einem Stoffwechsel-zuerst-Szenario aus, in dem selbsterhaltende chemische Reaktionen sich in zunehmend komplexen Netzwerken organisierten und schließlich den genetischen Code hervorbrachten (siehe »Spektrum« Juli 2023, S. 12). **5**

Diese beiden Ansätze müssen sich nicht ausschließen. Information und Stoffwechsel als Bestandteile des Lebens können ebenso in wechselseitiger Abhängigkeit entstanden sein. John Sutherland, Chemiker am Medical Research Council Laboratory of Molecular Biology (Cambridge, England), forscht über die Ursprünge des irdischen Lebens. Er gehört zu den Wissenschaftlern, die daran arbeiten, Information-zuerst- und Stoffwechsel-zuerst-Konzepte zusammenzuführen und somit die frühere Trennung zwischen den beiden zu überwinden.

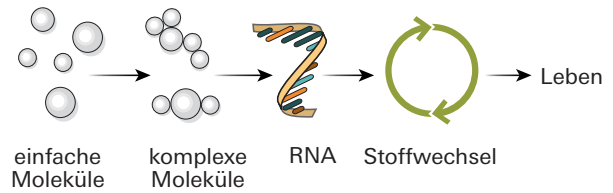
Sutherland betont: Solange wir nicht mehr darüber wüssten, was auf der frühen Erde geschehen sei, hätten wir keine Möglichkeit abzuschätzen, wie oft außerirdisches Leben im Weltall vorkomme. Dass es Billionen von Sternen und Planeten in Abermilliarden von Galaxien gebe, sei nicht zwangsläufig von Belang: Wenn die Ereignisse, die zu Leben führen, äußerst unwahrscheinlich und selten sind, könnten die vielen Himmelskörper statistisch gesehen trotzdem zu wenige sein, um mehrmals Abiogenese zu ermöglichen.

Im Jahr 2001 erschien in der Erstausgabe der Fachzeitschrift »Astrobiology« ein Artikel des Geowissenschaftlers Kenneth Nealson und der Astrobiologin Pamela Conrad mit dem Titel »A Non-Earth-Centric Approach to Life Detection«. Der Beitrag behandelt die Frage, wie sich Leben definieren und erkennen lässt und wie wir dabei die beschränkte irdische Perspektive überwinden. Ein solcher nicht geozentrischer Ansatz (»Non-Earth-Centric Approach«) fällt unserem Gehirn, das sich in irdischer Umgebung entwickelt hat, allerdings schwer. Wir sind notorisch schlecht darin, uns das Unbekannte vorzustellen. »Versuchen Sie mal, eine Farbe zu imaginieren, die Sie noch nie gesehen haben«, verdeutlicht Johnson das Problem.

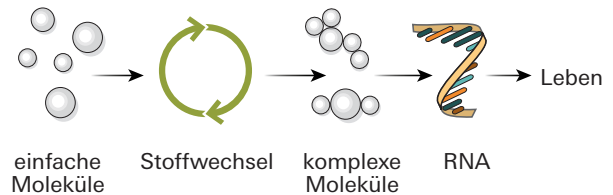
Daher nehmen Astrobiologen vor allem solche potenziellen Aliens in den Blick, die den Organismen auf unserem Heimatplaneten ähneln. Sie betrachten Sauerstoff in der Atmosphäre eines Exoplaneten als Indikator für Leben, weil wir dieses Gas benötigen. Sie werten Methanquellen auf dem Mars als Hinweis auf stoffwechselaktive Extraterrestrische, weil irdische Mikroben den Kohlenwasserstoff freisetzen. Sie kreieren Begriffe wie »habitable Zone« für jene Region um einen Stern, in der Planeten flüssiges Wasser beherbergen können – und setzen damit stillschweigend voraus, dass auf fernen Welten die gleichen Bedingungen als »lebensgünstig« anzusehen seien wie auf der Erde.

Selbst wenn Wissenschaftler eine ihnen unbekannt biologische Form entdecken, neigen sie dazu, sie mit etwas Vertrautem in Verbindung zu bringen. Als beispiels-

Information-zuerst-Hypothesen



Stoffwechsel-zuerst-Hypothesen



5 ZWEI KONZEPTE Unter Fachleuten kursieren zwei grundsätzlich verschiedene Vorstellungen dazu, wie das Leben auf der Erde entstanden sein könnte. Laut Information-zuerst-Hypothesen konnte sich das Leben erst bilden, als es informationstragende Moleküle wie die RNA gab. Stoffwechsel-zuerst-Modelle gehen davon aus, am Anfang hätten chemische Reaktionsnetzwerke gestanden, die nach und nach komplexer wurden und irgendwann Organismen hervorbrachten.

weise der niederländische Naturforscher Antonie van Leeuwenhoek im 17. Jahrhundert durch sein Mikroskop blickte und Einzeller sah, nannte er sie »animalcules«, kleine Tiere – was sie aber nicht sind.

Für Heather Graham, die am Goddard Space Flight Center der NASA arbeitet und in der LAB-Forschungsinitiative eine leitende Position bekleidet, steht van Leeuwenhoeks Entdeckung beispielhaft für eine erfolgreiche Suche nach »Leben, wie wir es nicht kennen«. Das gleiche gelte für den Nachweis der Archaeen, einer Domäne ursprünglich anmutender Einzeller, die erstmals in den 1970er Jahren beschrieben wurden. »Fremde Spielarten des Lebens zu beobachten, ist in der Wissenschaft nicht neu; die Leute machen das schon eine ganze Weile«, sagt die Forscherin.

Bei einem NASA-Workshop über Biosignaturen kam Graham mit Sarah Stewart Johnson und anderen Fachleuten zusammen, um zu diskutieren, wie sich Komplexität als Marker für Leben nutzen lässt. Überspitzt formuliert lautet der Ansatz: Wenn man auf dem Mars einen Supercomputer findet, weiß man vielleicht nicht, woher er stammt, aber es ist klar, dass er dort nicht spontan und zufällig entstanden ist. Jemand oder etwas muss ihn erschaffen haben.

Bei dem Treffen erarbeiteten die Teilnehmer einen Vorschlag zur Entwicklung eines Messinstruments, den sie der NASA unterbreiteten. Das Gerät sollte Moleküle aufspüren, deren Formen zusammenpassen wie Schlüs-

sel und Schloss. Solche Kombinationen treten in unbelebten chemischen Umgebungen selten auf, lassen sich in lebenden Zellen aber überall nachweisen. Der Vorschlag wurde nicht angenommen, doch die NASA rief bald darauf interdisziplinäre Arbeitsgemeinschaften für astrobiologische Forschung ins Leben. Damit verknüpft waren mehrjährige Förderprogramme, um einschlägige wissenschaftliche Projekte zu unterstützen.

Johnson und ihre Mitstreiter nahmen das zum Anlass, Planetenforscher, Biologen, Chemiker, Informatiker, Mathematiker und Ingenieure ins Team zu holen. Gemeinsam erarbeiteten sie Konzepte für Messinstrumente, mit denen sich eventuell vorhandene lebende Strukturen auf den Jupiter- und Saturnmonden Europa, Enceladus und Titan nachweisen lassen. »Diese Himmelskörper erscheinen aus menschlicher Sicht äußerst fremdartig und seltsam«, sagt Johnson. Dort habe man folglich die Chance, auf »exotisches« Leben zu stoßen, das uns auf der Erde nicht begegnet.

All diese Bemühungen mündeten in die LAB-Forschungsinitiative. Die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wollen beispielsweise herausfinden, wie sich aus der Komplexität von Oberflächen, ungewöhnlichen Anhäufungen bestimmter Stoffe und spezifischen Mechanismen der Energieübertragung auf Leben schließen lässt, wie wir es noch nicht kennen.

Blick in die Vergangenheit

LAB kombiniert Feldforschung, Laborexperimente und theoretische Arbeiten. Geplant ist unter anderem ein Besuch in der kanadischen Kidd-Creek-Mine, die mehr als 3000 Meter in die Tiefe führt. Dort unten befinden sich die Überreste eines Ozeanbodens, der vor 2,7 Milliarden Jahren vulkanisch aktiv war und infolgedessen Sulfiderze enthält. Die Bedingungen, die hier vor Jahrmilliarden herrschten, könnten denen auf »Ozeanwelten« wie dem Jupitermond Europa ähneln. In der Mine hoffen die Wis-

senschaftler, Unterschiede zu finden zwischen Mineralien, die sich durch Kristallisation bilden, und Gesteinsstrukturen, die auf biologische Vorgänge zurückgehen. Die zwei ähneln einander oft, da beide geordnet sind. Die Forscherinnen und Forscher möchten die Art der dort vorgefundenen abiotischen Kristalle vorhersagen können. Dabei sollen geochemische Modelle helfen, die computergestützt simulieren, wie Chemikalien aus gesättigten Lösungen ausfallen.

In der Kidd-Creek-Mine treten so genannte Kiddcreekite auf, kristalline Substanzen aus Kupfer, Zinn, Wolfram und Schwefel. Ihr Niederschlag aus gesättigten Lösungen lässt sich am Rechner simulieren. Die entsprechenden Computermodelle sollten jedoch daran scheitern, biologisch entstandene Strukturen vorherzusagen, da diese sich auf Grund anderer Wechselwirkungen und nach anderen Regeln bilden. Falls die Annahme zutrifft, könnten sich geochemische Modelle als nützlich erweisen, um auf anderen Himmelskörpern biotische von abiotischen Strukturen zu unterscheiden.

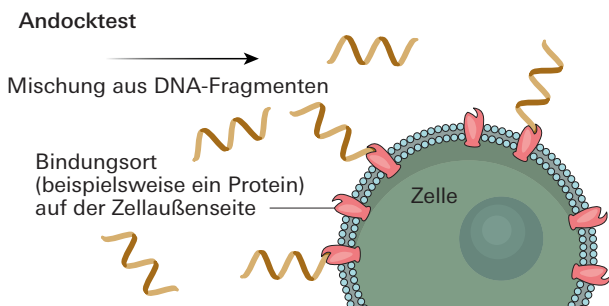
Ein weiterer Ansatz lautet, die Zahl der Bindungsorte auf Partikeln zu bestimmen, an denen sich Moleküle anlagern – etwa Stellen, an die Antikörper koppeln. »Unsere These besagt, dass es auf etwas Komplexem wie einer Zelle mehr Bindungsstellen gibt als beispielsweise auf einem unbelebten Staubkorn«, erläutert Johnson.

Um das zu testen, erzeugen die Forscherinnen und Forscher eine zufällig zusammengestellte Mischung aus DNA-Schnipseln und beschicken eine biologische Zelle damit. Einige Schnipsel heften sich an deren Außenseite, andere nicht. Die gebundenen entfernt das Team und sammelt sie ein, die ungebundenen sendet es erneut zur Zielzelle. Das Ganze wird mehrfach wiederholt. Am Ende sehen die Wissenschaftler, wie viele Schnipsel angekoppelt haben und wie viele in der Lösung geblieben sind. Dieses Verhältnis lässt sich für verschiedene Partikelarten bestimmen, etwa Mikroben und mineralische Körner, und entsprechend vergleichen. **6**

6 ANGEKOPPELT Ein möglicher Ansatz, Leben von Nichtleben zu unterscheiden, besteht darin, die Zahl der Bindungsstellen (etwa für Nukleinsäureschnipsel) auf einem Partikel zu bestimmen. Auf etwas Komplexem wie einer lebenden Zelle sollte es in der Regel mehr solche Stellen geben als auf einem unbelebten Körnchen, so die These dahinter.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen Nichtleben und Leben: Ersteres ist meist im Gleichgewicht mit seiner Umgebung, während Letzteres Energie aufwendet, um sich von der Umwelt zu separieren. »Lebewesen müssen Ressourcen investieren, um sich nach außen abzugrenzen«, sagt der Biologe Peter Girguis von der Harvard University. Der Zweig eines Baums etwa unterscheidet sich im Wassergehalt, in den Stoffwechselaktivitäten und so weiter von seiner Umgebung. Schneidet man ihn ab, beraubt man ihn seiner Energiezufuhr und er stirbt ab. »Anschließend löst er sich immer weiter auf, bis es keine Unterschiede mehr zwischen ihm und der Umwelt gibt«, sagt Girguis. »Mit anderen Worten: Es stellt sich ein Gleichgewicht ein.« **7**

Das Ungleichgewicht, das lebende Strukturen kennzeichnet, sollte sich in aller Regel als chemisches Gefälle zwischen Organismen und ihrer Umwelt zeigen – unabhängig davon, woraus genau sie jeweils beschaffen sind. »Ich kann eine fremde Umgebung analysieren und darin etwa die Verteilung von Kalium ermitteln«, sagt Girguis.





JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2023; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

7 GLEICH- UND UNGLEICHGEWICHT Lebende Strukturen wenden Energie auf, um sich von der Umwelt zu separieren. Sie sind deshalb im Ungleichgewicht mit ihrer Umgebung, was sich als chemisches Gefälle zwischen ihnen und dem Außenraum äußert. Nicht lebende Strukturen dagegen befinden sich meist im Gleichgewicht mit ihrer Umwelt und weisen deshalb kein solches Gefälle auf.

Komme dabei heraus, dass die Kaliumkonzentration an manchen Orten deutlich höher liegt als an anderen, handele es sich um einen möglichen Hinweis auf biologische Aktivität.

Die Forschungsarbeiten von Girguis sind mit einem weiteren thematischen Schwerpunkt der LAB-Initiative verknüpft: dem Konzept der chemischen Fraktionierung. Es besagt, dass lebende Organismen manche Elemente beziehungsweise Isotope gegenüber anderen bevorzugen. Ein Team um Christopher House von der Pennsylvania State University befasst sich mit diesem Phänomen und nutzt Messdaten von Raumsonden, um die chemische Zusammensetzung von Planeten und Monden zu untersuchen. »So wie irdische Lebewesen Isotope und Elemente selektiv aufnehmen oder abweisen, kann man sich das auch bei außerirdischen Organismen vorstellen«, erklärt House, »freilich dürften bei diesen andere Stoffe und Isotope eine Rolle spielen.«

Eine Frage des Durchmessers

House und sein Team untersuchen Sedimente in Westaustralien, die Spuren früher irdischer Lebensformen bergen. Anhand dieser Gesteinsanalysen hoffen die Forscher zu erkennen, welche Isotope beziehungsweise Elemente die damaligen Organismen anreicherten. »Vielleicht lassen sich daraus allgemeine Schlüsse ziehen, welche chemischen Muster mit der Existenz von Leben einhergehen«, sagt House.

Eine LAB-Forschungsgruppe für theoretische Studien, geleitet von Chris Kempes vom Santa Fe Institute in New Mexico, beschäftigt sich mit solchen Verallgemeinerungen. Ihre Arbeiten drehen sich um so genannte Skalierungsphänomene. Konkret geht es darum, wie sich die Biochemie des Zellinnenraums mit wachsendem Zelldurchmesser verändert, ob dies in vorhersagbarer Weise geschieht und ob die relativen Häufigkeiten unterschiedlich großer Zellen einem Muster folgen. Kempes, House, Graham und ihre Mitarbeiter veröffentlichten 2021 im Fachblatt »Bulletin of Mathematical Biology« einen Artikel darüber, wie sich entsprechende Skalierungsgesetze auf

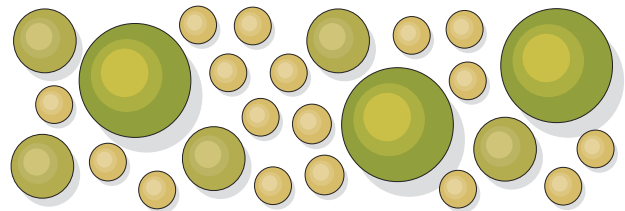
Bakterien anwenden lassen. Sortiert man Mikroben beispielsweise nach Größe, stellt man fest: Die chemischen Verhältnisse unterscheiden sich mit zunehmender Zellgröße immer stärker von jenen der Umgebung.

Die relativen Häufigkeiten von Zellen unterschiedlicher Größe folgen üblicherweise einer Potenzfunktion: Die kleinsten sind am zahlreichsten; mit wachsendem Zelldurchmesser werden sie immer seltener. Zeigen sich in einer Probe außerirdischen Materials die gleichen mathematischen Beziehungen (viele kleine Einheiten, die ihrer Umgebung ähneln, und wenige große, die von der Umwelt stärker abweichen), könnte das auf lebende Organismen hindeuten. Und zwar unabhängig davon, welche chemischen Verhältnisse in der Probe und auf dem jeweiligen Himmelskörper konkret herrschen. **8**

Leroy Cronin hat eigene Ideen zur Unterscheidung zwischen lebendig und nicht lebendig. Er verfiert die so genannte Assembly-These, laut der man feststellen kann, ob eine Sache komplex ist, ohne etwas über ihren Ursprung zu wissen. Je komplexer ein Molekül, desto wahrscheinlicher ist es, dass es einem Lebewesen entstammt. Denn der sich selbst erhaltende, sich selbst reproduzierende Stoffwechselapparat biologischer Organismen basiert auf komplizierten makromolekularen Verbindungen und den Aggregaten, zu denen sie sich zusammenlagern. Laut Assembly-These lässt sich die Komplexität von Molekülen mit ihrer »Zusammenbauzahl« beziffern. Diese gibt an, wie viele Bausteine in jeweils welcher Menge zusammengefügt werden müssen, um das entsprechende Molekül hervorzubringen. Nehmen wir zur Veranschaulichung das Wort »Abrakadabra«. Um es zu erzeugen, fügt man zunächst ein A und ein b zusammen. Es kommt »Ab« heraus, zu dem wir r addieren und anschließend a, um »Abra« zu erhalten. Weiterhin geben wir k, a und schließlich d hinzu, um »Abrakad« zu bekommen. Fügt man jetzt das »abra« an, das bereits in einem früheren Schritt gebildet wurde, ist man am Ziel. Das ergibt insgesamt sieben Schritte, womit »Abrakadabra« eine Zusammenbauzahl von Sieben hat.

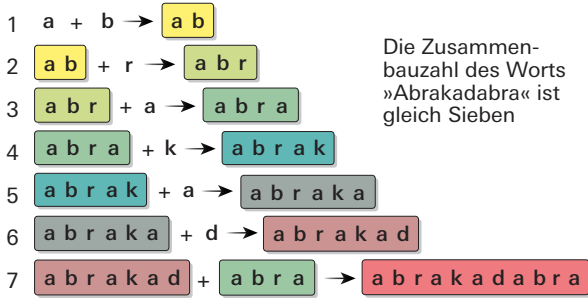
Cronin und sein Team vermuten: Moleküle mit hoher Zusammenbauzahl hinterlassen bei massenspektrometrischen Untersuchungen einen komplizierten »Fingerab-

8 GROSS UND KLEIN Die relativen Häufigkeiten von irdischen Einzellern verschiedener Größe folgen oft einer Potenzfunktion: Die kleinsten sind am zahlreichsten; mit wachsendem Zelldurchmesser werden sie immer seltener. Das könnte auch auf außerirdische Organismen zutreffen.



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2023; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Assembly-These



9 ASSEMBLY-THESE Je komplexer ein Molekül, desto größer ist seine »Zusammenbauzahl«, die angibt, wie viele Bausteine in jeweils welcher Menge zusammengefügt werden müssen, um es hervorzu- bringen. Überschreitet die Komplexität einen be- stimmten Schwellenwert, entstammt das Molekül wahrscheinlich einem Lebewesen.

druck«. (Ein Massenspektrometer trennt die Bestandteile einer Probe nach ihrer Masse und elektrischen Ladung; anhand der Messdaten kann man erkennen, woraus die Probe besteht.) Je komplexer demnach ein Molekül, umso mehr Messwertausschläge liefert die massenspektrometrische Analyse – unter anderem deshalb, weil komplizierter aufgebaute Moleküle mehr Bindungen enthalten. Die Zahl dieser Ausschläge wiederum ist ein grobes Maß für die Zusammenbauzahl. **9**

Cronin postulierte, dass sich mit Hilfe der Massenspek- trometrie die Komplexität einer chemischen Verbindung ermitteln lässt, ohne überhaupt zu wissen, um welche es sich handelt. Falls das dabei ermittelte Ergebnis einen gewissen Schwellenwert überschreite, so die Annahme, stamme das Molekül wahrscheinlich aus einem biologi- schen Prozess.

Um dies zu prüfen, stellte ihm die NASA im Rahmen der LAB-Initiative verschiedene Proben zur Verfügung, die entweder biologischen Ursprungs waren oder nicht. Das Material stammte unter anderem aus dem Weltraum, fossilen Lagerstätten, Gewässersedimenten und vom Murchison-Meteoriten, einem rund 100 Kilogramm schweren Brocken mit hohem Gehalt an organischen Verbindungen. Während der Messungen und ihrer Aus- wertung wusste keiner der Experimentierenden, um welche Probe es sich jeweils handelte; dies wurde erst hinterher aufgedeckt. »Alle dachten, unser Messverfahren würde versagen – vor allem, weil der Murchison-Klumpen zu den komplexesten interstellaren Materialien gehört, die wir kennen«, erzählt Cronin. Doch die Methode bewährte sich: »Salopp ausgedrückt, teilte sie uns mit, dass der Meteorit ein bisschen seltsam beschaffen ist, aber nicht zu den Lebewesen gehört.«

Eine andere Probe enthielt Material von 14 Millionen Jahre alten Fossilien. Die Fachleute nahmen an, wegen des hohen Alters würde das Messverfahren sie als »unbe-

lebter Herkunft« einordnen. Aber das war nicht der Fall. »Die Technik kam rasch dahinter, dass jene Probe biologi- schen Ursprungs ist«, schildert Cronin. Im Jahr 2021 publizierte seine Forschungsgruppe ihre Ergebnisse in der Fachzeitschrift »Nature Communications«.

Die Überlegungen zu (extraterrestrischem) Leben, wie wir es nicht kennen, wirken sich schon heute darauf aus, wie Fachleute erdähnliche Verhältnisse auf Exoplaneten bewerten. Victoria Meadows von der University of Wa- shington beschäftigt sich seit zwei Jahrzehnten mit Messdaten solch ferner Himmelskörper und hat miterlebt, wie sich ihre Disziplin verändert hat. Früher hätte man den Nachweis von Sauerstoff auf einem Exoplaneten als Volltreffer bei der Suche nach Leben angesehen. Heute sei das nicht mehr so. »Es hat sich die Erkenntnis durch- gesetzt, dass mutmaßliche Biosignaturen im Kontext ihrer Umgebung interpretiert werden müssen«, sagt Meadows. Man müsse die Verhältnisse auf einem fernen Planeten und seinem Mutterstern erst hinreichend gut kennen, um einschätzen zu können, was die Existenz von Sauerstoff dort bedeute. Das Element müsse nicht zwangsläufig auf Leben hindeuten, sondern könnte beispielsweise einem siedenden Ozean entweichen.

Die Suche nach agnostischen Biosignaturen ist aus Meadows' Sicht das geeignete Vorgehen, um nach Leben im Kosmos zu fahnden. Doch sei auf diesem Feld noch ein weiter Weg zurückzulegen. »Die Forschung steckt in den Kinderschuhen; umso wichtiger sind die Pionierarbei- ten, die die LAB-Initiative hier leistet.«

Zu den wichtigsten Zielen des LAB-Projekts gehört es, Instrumente zu entwickeln, mit denen Raumsonden fremdartiges Leben erkennen können. Einzelne Daten von einzelnen Geräten liefern dabei keinen zuverlässigen Nachweis. Die Fachleute arbeiten daher an Instrumenten- gruppen, deren Komponenten in unterschiedlichsten Umgebungen zusammenarbeiten. Solche Geräteensem- bles könnten zum Beispiel nach Molekülen mit großer Zusammenbauzahl suchen, die sich an einzelnen Orten ansammeln, welche sich deutlich von ihrer Umwelt unterscheiden.

Selbst wenn ein derartiges Verfahren eines Tages einen Treffer liefert, wird das wahrscheinlich die Frage noch nicht endgültig beantworten, ob es außer den irdischen noch andere Lebewesen im All gibt. Auf jeden Fall dürften umfangreiche Folgeuntersuchungen nötig sein – und die werden angesichts der riesigen Entfernungen im Kosmos dauern und kosten. Die Suche nach Aliens, so viel ist sicher, erfordert jede Menge Geduld. ◀

QUELLEN

Conrad, P.G., Neelson, K.H.: A non-earthcentric approach to life detection. *Astrobiology* 1, 2001

Kempes, P.K. et al.: Generalized stoichiometry and biogeoche- mistry for astrobiological applications. *Bulletin of Mathematical Biology* 83, 2021

Marshall, S.M. et al.: Identifying molecules as biosignatures with assembly theory and mass spectrometry. *Nature Commu- nications* 12, 2021

PHYSIOLOGIE

Schneller fliegen dank Genverlust

Kolibris schwirren wie Helikopter – und praktizieren damit die energieaufwändigste Fortbewegungsart im Tierreich. Möglich ist ihnen das unter anderem, weil eine ihrer Erbanlagen ausgefallen ist.

Die farbenprächtigen Kolibris sind die einzigen Vögel, die einen echten Schwebeflug oder Schwirrflug ausdauernd beherrschen. Spezielle Anpassungen im Schultergelenk, durch die der Flügel sowohl beim Auf- als auch beim Abschlag einen Auftrieb erzeugt, ermöglichen diese Fähigkeit. Vergleicht man Vögel mit Flugzeugen, dann sind Kolibris die Hubschrauber unter ihnen.

Der Schwebeflug verleiht Kolibris eine außergewöhnliche Manövrier-

fähigkeit. So sind sie auch die einzigen ihrer Wirbeltierklasse, die rückwärts fliegen können. Während des Schwirrflugs schlagen sie zeitweise mehr als 80-mal pro Sekunde mit den Flügeln und erzeugen dabei ein charakteristisches Summen. Das hat ihnen im Englischen die Bezeichnung »Hummingbird« (»summender Vogel«) eingebracht.

Der Schwebeflug ist sehr kostspielig: Es handelt sich um die energieaufwändigste Fortbewegungsart im

Tierreich. Die rund 360 Kolibriarten ernähren sich allesamt von Blütennektar, der reichlich Glukose und Fruktose enthält. Die Flugmuskeln verstoffwechseln diesen Zucker sehr effizient, was den Tieren ihre anspruchsvollen aviatischen Künste erlaubt. Welche genetischen Merkmale den entsprechenden Stoffwechsellanpassungen zu Grunde liegen, wussten die Fachleute bisher nicht.

Mein Team und ich haben untersucht, welche genomischen Beson-

HELIKOPTERVÖGEL Kolibris beherrschen den Schwebeflug. Dabei stehen sie in der Luft, was es ihnen beispielsweise ermöglicht, Nektar aus schwer zugänglichen Blüten zu trinken.



derheiten die Flugfähigkeiten der Kolibris ermöglichen. Der Schwebeflug ist – ebenso wie die Blütennektardiät – wahrscheinlich ein so genanntes anzestrales Merkmal dieser Vögel, das heißt schon der letzte gemeinsame Vorfahre der zirka 360 heute lebenden Kolibrispezies dürfte dazu in der Lage gewesen sein. Um Änderungen auf DNA-Ebene zu finden, die zur Evolution des Schwebeflugs beigetragen haben könnten, sollte man deshalb nach Erbguteigenschaften suchen, die bereits in diesem Ahnen zu finden waren. Er lebte aber vor ungefähr 22 Millionen Jahren und hat keine bekannten Fossilien hinterlassen. Ohnehin erhält sich DNA über solch lange Zeiträume hinweg nicht; daher kann man nur aus Genomanalysen an heute lebenden Kolibris auf das Erbgut ihres gemeinsamen Vorfahren rückschließen.

Sparsames Verfahren

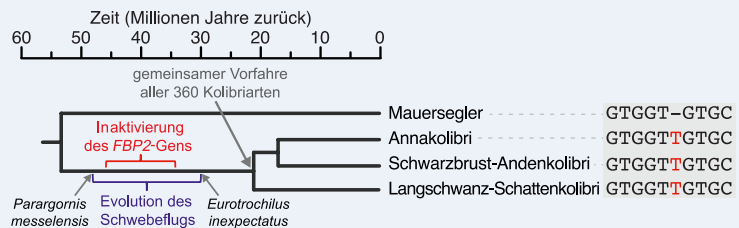
Zu Beginn unserer Studie lag nur von zwei nahe verwandte Kolibriarten ein sequenziertes Genom vor. Es auch noch für alle übrigen Spezies zu sequenzieren, hätte viele Jahre gedauert. Zu Glück war das dank des »Prinzips der maximalen Sparsamkeit« nicht nötig: Wir ermittelten die DNA-Sequenz des Langschwanz-Schattenkolibris (*Phaethornis superciliosus*), der sich evolutionär sehr früh von den anderen Kolibriarten abgespalten hat. Aus dem Prinzip der maximalen Sparsamkeit ergibt sich: Eine Mutation, die sowohl bei den zwei nah verwandten Spezies als auch beim Langschwanz-Schattenkolibri zu finden ist, existierte wahrscheinlich bereits im gemeinsamen Vorfahren.

Die stammesgeschichtlich nächsten Verwandten der Kolibris sind die Segler, zu denen beispielsweise der Mauersegler gehört; beide gehen auf einen gemeinsamen Ahnen vor etwa 54 Millionen Jahren zurück. Ist eine genetische Mutation, die alle drei sequenzierten Kolibriarten gemein haben, im Erbgut von Mauerseglern nicht nachweisbar, dann lässt sich daraus schließen, dass diese Muta-

Inaktivierung macht aktiver

Ein Stammbaum dreier Kolibriarten, deren Genom sequenziert wurde, sowie des Mauerseglers zeigt deren Verwandtschaftsverhältnisse untereinander (siehe Bild unten, linke Hälfte). Die Vogelfamilien der Segler und der Kolibris haben sich vor schätzungsweise 54 Millionen Jahren evolutionär getrennt. Der gemeinsame Vorfahre aller heutigen Kolibrispezies lebte vor etwa 22 Millionen Jahren. Im Stammbaum gekennzeichnet sind die mutmaßlichen Zeiträume, in denen sich der Schwebeflug entwickelt hat beziehungsweise das *FBP2*-Gen seine Funktion verlor. Die datierten Alter wichtiger Fossilien sind ebenfalls gekennzeichnet.

Rechts im Bild zu sehen sind die artspezifischen DNA-Basensequenzen innerhalb des *FBP2*-Gens, das eine wichtige Rolle im Zuckerstoffwechsel spielt. Alle drei Kolibriarten, deren Erbgut sequenziert worden ist, weisen dort eine eingefügte Thymin-Base (»T«) auf, die sich nicht im Mauersegler und auch nicht in anderen Vogelspezies findet. Wahrscheinlich besaß bereits der gemeinsame Vorfahre aller Kolibris jene Veränderung und vererbte sie an seine Nachkommen. Diese und andere Mutationen verhindern die Herstellung eines funktionstüchtigen *FBP2*-Enzyms und kurbeln damit den Zuckerabbau an.



tion erstmals in der Linie der Kolibri-vorfahren auftauchte.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen suchten wir systematisch nach Mutationen, die in den drei Kolibrispezies, nicht aber in Mauerseglern und 45 weiteren Vogelarten zu finden sind. Dabei konzentrierten wir uns auf Erbgutveränderungen, die Gene funktionslos machen. Wir fanden nur wenige inaktivierte Gene – eines davon übt allerdings eine wichtige Funktion im Zuckerstoffwechsel aus. Jene Erbanlage mit der Bezeichnung *FBP2* (für: Fruktose-Bisphosphatase 2) trägt die Bauanleitung für ein so genanntes FBPase-Enzym. Überbleibsel von ihr sind noch im Kolibrigenom vorhanden, aber so

verändert, dass sie kein funktionsfähiges Protein mehr hervorbringen.

Der Bauplan für das FBPase-Enzym liegt bei Vögeln – ebenso wie beim Menschen – auf zwei verschiedenen Genen: *FBP1* und *FBP2*. *FBP1* ist bei allen von uns untersuchten Vögeln funktional, *FBP2* ist bei Kolibris (und nur bei diesen) inaktiviert. Beide Erbanlagen kodieren gleichwertige Enzyme, sind aber für unterschiedliche Gewebe zuständig. *FBP1* ist hauptsächlich in der Leber und in den Nieren aktiv, *FBP2* nur in der Skelettmuskulatur. Das warf die Frage auf, ob im Muskelgewebe der Kolibris das (intakte) *FBP1*-Gen möglicherweise die Funktion des (defekten) *FBP2* übernimmt. Wir untersuch-

ten dies mit Hilfe von Genexpressionsanalysen und stellten fest: *FBP1* ist in der Skelettmuskulatur der Kolibris nicht angeschaltet. Die Tiere produzieren somit funktionstüchtige FBPase-Enzyme in der Leber, aber nicht in den Muskeln.

Welche Aufgabe hat die FBPase im Organismus? Körperzellen bauen Zuckerverbindungen in einem enzymatisch gesteuerten Prozess namens Glykolyse ab. Hierbei wird jeweils ein Zuckermolekül mit sechs Kohlenstoffatomen in zwei kleinere mit je drei

könnte den Zuckerabbau – und somit die Fähigkeit der Kolibris, Kohlenhydrate für den energieintensiven Schwebeflug zu verwerten –, beschleunigt haben.

Wir beschlossen, die Hypothese experimentell zu prüfen. Da es nur sehr schwer möglich ist, lebende Vögel genetisch zu manipulieren und anschließenden Tests zu unterziehen, führten wir die Versuche mit Muskelzellen durch. Diese stammten von Wachteln, die ein funktionales *FBP2*-Gen besitzen. Wir analysierten, wie sich deren Zuckerstoffwechsel verändert, wenn man das *FBP2*-Gen gezielt inaktiviert. Tatsächlich beschleunigt sich dann die Glykolyse in den Zellen, wie unsere Messungen belegen. Außerdem besitzen entsprechend veränderte Muskelzellen mehr Mitochondrien. Beides deutet darauf hin: *FBP2* auszuschalten, kurbelt sowohl die Glykolyse als auch die Aktivität der Mitochondrien an – und erlaubt den Muskelzellen somit, mehr Energie bereitzustellen.

Wenn die Inaktivierung von *FBP2* einer der Faktoren war, die zu den Stoffwechselanpassungen des Schwebeflugs beigetragen haben, dann sollte der Verlust des Gens zeitlich mit der Evolution jener Fähigkeit zusammenfallen. Verschiedenen Hinweisen zufolge ist dem tatsächlich so. Zunächst haben wir versucht, den Funktionsverlust von *FBP2* zeitlich einzugrenzen. Anhand bestimmter Mutationsmuster lässt sich abschätzen: Das Gen wurde irgendwann zwischen 46 und 34 Millionen Jahren vor heute inaktiv. Den vermuteten Entstehungszeitraum des Schwebeflugs wiederum kennt man aus Grund von wichtigen Fossilienfunden. So fanden sich in der Grube Messel (Südhessen) in 48 Millionen Jahre altem Gestein die Überreste eines Insekten fressenden Vogels namens *Parargornis messelensis*, der einige Ähnlichkeiten zu Seglern aufwies und vermutlich keinen Schwebeflug beherrschte. Das älteste Fossil des kolibriähnlichen Vogels *Eurotrochilus inexpectatus* hingegen, das anatomische Merkmale einer Nektardiät und des Schwebeflugs aufweist, datiert auf 30 bis 35 Millionen Jahre vor heute.

Zusammengenommen deuten diese Befunde darauf hin, dass sich Schwebeflug und Nektarernährung vor 30 bis 48 Millionen Jahren entwickelt haben – und die Inaktivierung von *FBP2* ebenfalls in diesen Zeitraum fiel. Der Ausfall des Gens trug vermutlich zu den metabolischen Anpassungen bei, die für den Schwirrflyg erforderlich sind. Diese betreffen lediglich das Muskelgewebe, da *FBP2* nur dort abgelesen wird.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass der funktionale Verlust von Erbanlagen evolutionär manchmal von Vorteil ist. Das mag überraschen, da Gene oft wichtige Funktionen ausüben und ihre Inaktivierung in der Regel schädlich wirkt. Bei den Kolibris jedoch hat sie den muskulären Zuckerstoffwechsel angekurbelt und den Tieren damit ihre energiezehrende Lebensweise ermöglicht.

Komplexe Anpassungen wie der Schwebeflug gehen mit zahlreichen anatomischen, physiologischen und genomischen Veränderungen einher. Entsprechend haben wir bei den Kolibris noch weitere Unterschiede in Protein- und Gensequenzen gefunden, die den Zuckerstoffwechsel betreffen. Zusätzliche Studien werden nötig sein, um deren Auswirkungen zu verstehen. Unsere Erkenntnisse zu *FBP2* sind erst der Anfang auf dem Weg, die Evolution des Schwebeflugs bei diesen einzigartigen Vögeln vollständig aufzuklären. ◀

Michael Hiller arbeitet als Professor am LOEWE-Zentrum für Translationale Biodiversitätsgenomik in Frankfurt am Main.

Michael Hiller arbeitet als Professor am LOEWE-Zentrum für Translationale Biodiversitätsgenomik in Frankfurt am Main.

QUELLEN

Osipova E. et al.: Loss of a gluconeogenic muscle enzyme contributed to adaptive metabolic traits in hummingbirds. *Science* 379, 2023

Warrick D.R. et al.: Aerodynamics of the hovering Hummingbird. *Nature* 435, 2005

Weis-Fogh T.: Energetics of hovering flight in Hummingbirds and in Drosophila. *Journal of Experimental Biology* 56, 1972

Die Beobachtungen an Kolibris zeigen, dass der funktionale Verlust von Genen manchmal Vorteile bringt

Kohlenstoffatomen zerlegt. Mit der frei werdenden Energie bildet die Zelle zwei Moleküle ATP, das als universeller Energieträger viele physiologische Prozesse antreibt, einschließlich der Kontraktion von Muskelzellen. Mitochondrien, die »Kraftwerke der Zelle«, verwerten die 3-Kohlenstoff-Moleküle im mitochondrialen Stoffwechsel, wobei viele weitere ATP-Moleküle entstehen.

Einmal hin, einmal her

Biochemische Reaktionen können oft in Hin- und Rückrichtung ablaufen. Das gilt auch für die Glykolyse: Bei ihrem umgekehrten Prozess, der »Gluconeogenese«, setzt der Enzymapparat ein Zuckermolekül aus zwei 3-Kohlenstoff-Molekülen zusammen. Die FBPase nimmt dabei eine Schlüsselrolle ein. Mein Team und ich vermuteten daher, dass der Verlust von *FBP2* die Glykolyse in Muskelzellen effizienter macht, da die in entgegengesetzter Richtung ablaufende Gluconeogenese auf Grund fehlender FBPase nicht stattfinden kann. Dies

Reaktionsabläufe rasch analysiert

Die molekularen Abläufe einer chemischen Reaktion zu entschlüsseln, erfordert bislang harte Arbeit und jede Menge Expertenwissen. Mit einem neuen maschinellen Lernmodell könnte das jetzt deutlich einfacher und schneller gehen.

Um eine neue chemische Reaktion zu entwerfen, braucht es zum einen genügend experimentelle Daten, zum anderen müssen sie entsprechend auswertbar sein. Besonders wichtig ist es, katalytische Reaktionen zu verstehen, denn sie sind die effizientesten chemischen Prozesse. Ausgerechnet deren Me-

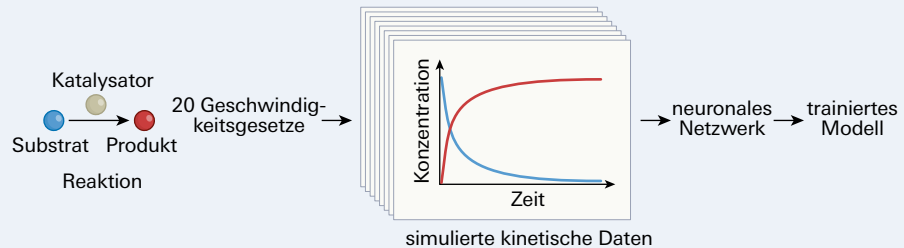
chanismen sind aber besonders knifflig zu entschlüsseln, so dass man den molekularen Vorgängen nur mit viel Fachwissen in theoretischer sowie physikalischer organischer Chemie auf die Spur kommt.

Ein Modell auf Basis maschinellen Lernens, das Jordi Burés und Igor Larrosa von der University of Man-

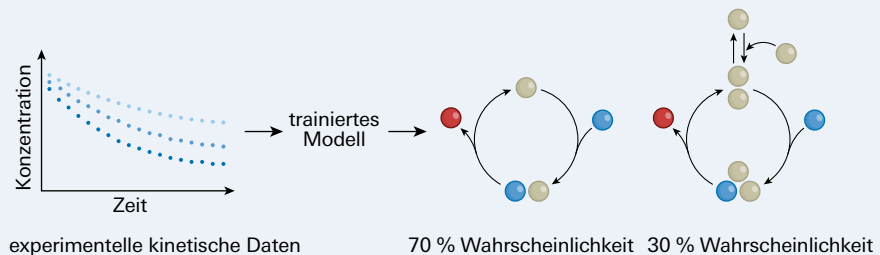
chester (UK) jetzt entwickelt haben, könnte die Untersuchung von Reaktionsmechanismen deutlich vereinfachen. Das System klassifiziert die molekularen Abläufe katalytischer Reaktionen anhand ihrer typischen Zeitverläufe. Das Praktische dabei: Das Modell braucht nur die Daten aus wenigen Experimenten, um eine

Von der Reaktion zum Mechanismus

a Die Autoren der Studie betrachteten einen allgemeinen Satz von Reaktionen, bei denen ein Substratmolekül (blau) durch einen Katalysator (grau) in ein Produkt (rot) umgewandelt wird. Sie ermittelten 20 mögliche Mechanismen und errechneten für jeden das Geschwindigkeitsgesetz. Diese Gleichung beschreibt die Reaktionskinetik: mit welchen Geschwindigkeiten das Substrat verbraucht und das Produkt gebildet wird. Die Fachleute lösten die Gleichungen der Geschwindigkeitsgesetze und erzeugten damit mehrere Millionen simulierter kinetischer Profile. Diese Lösungen speisten sie in ein maschinelles Lernsystem (ein neuronales Netz) ein. So entstand ein trainiertes Modell.



b Das Modell kann kinetische Daten von echten Reaktionen verarbeiten. Es identifiziert die möglichen Mechanismen und gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie stimmen. In dem gezeigten Fall ist der wahrscheinlichste Mechanismus ein einfacher Prozess, bei dem das Substrat (blau) einen Komplex mit einem Katalysatormolekül (grau) bildet, woraus dann das Produkt (rot) entsteht. Bei dem weniger wahrscheinlichen Mechanismus lagern sich zuerst zwei Katalysatormoleküle zusammen, anschließend bindet sich das Substrat an das entstandene Doppelmolekül.



LUSTOSA, D.M., MILO, A.: MACHINE LEARNING CLASSIFIES CATALYTIC-REACTION MECHANISMS. NATURE 613, 2023, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

Reaktion treffsicher der richtigen Mechanismuskategorie zuzuordnen.

Auf der Suche nach dem molekularen Mechanismus einer katalytischen Reaktion sammelt man zunächst eine Fülle von Hinweisen darauf, wie die Ausgangsstoffe zusammenfinden, mit dem Katalysator sowie miteinander reagieren und schließlich die Produkte bilden. Bei einer der leistungsfähigsten Untersuchungstechniken, der kinetischen Analyse, beobachten Fachleute den Zerfall der Ausgangsstoffe und die Bildung der Produkte im Zeitverlauf. Wie rasch diese Prozesse ablaufen, lässt sich am besten anhand so genannter Geschwindigkeitsgesetze beschreiben.

Komplexe Gesetze

Diese Formeln gründen auf der Annahme, dass bestimmte Parameter über die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion entscheiden: die Konzentrationen der Reagenzien, die Anzahl der an den einzelnen Schritten beteiligten Moleküle sowie die Energie, die nötig ist, damit sich aus den Reaktionspartnern kurzlebige Zwischenprodukte bilden, aus denen schließlich die erwünschten Stoffe entstehen. Durch das Entschlüsseln komplexer Geschwindigkeitsgesetze lässt sich besser begreifen, welche Moleküle an jedem einzelnen Schritt eines Katalysezyklus beteiligt sind und in welcher Reihenfolge die Schritte ablaufen. Mechanistische Informationen beeinflussen demnach stark das Design neuer chemischer Reaktionen.

Seit mehr als 100 Jahren leiten Fachleute solche Informationen aus Reaktionsgeschwindigkeiten ab. Bei einer Methode, die auch heute noch angewandt wird, untersucht man die Anfangsgeschwindigkeit einer Reaktion. Dabei konzentriert man sich darauf, wie rasch die ersten paar Prozent der Ausgangsstoffe verbraucht werden. Die Methode ist beliebt, weil die Konzentrationskurven der Reaktanden zu Beginn meist linear verlaufen und daher einfach zu analysieren sind. Aber so aufschlussreich die Herangehensweise auch ist, lässt

Es würde Jahre dauern, die benötigte Menge an Informationen in Laborexperimenten zu erzeugen

sie doch außer Acht, wie sich Reaktionsgeschwindigkeiten und Konzentrationen im weiteren Zeitverlauf ändern.

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden ausgeklügelte Methoden entwickelt, um die Konzentrationen der Stoffe während der gesamten Reaktion zu untersuchen. Als hilfreich erwiesen sich dabei mathematische Verfahren, die auf Grund kinetischer Informationen ermitteln, wie viele Komponenten an welchem Reaktionsschritt beteiligt sind. Solche Werkzeuge werden sicherlich auch weiterhin wichtige Einblicke in die chemische Reaktivität erlauben, doch sie liefern keinen ganzheitlicheren Vorschlag, der beschreibt, wie sich das katalytische System kinetisch verhält.

Maschinelles Lernen revolutioniert derzeit die Art und Weise, chemische Probleme zu lösen – das geht vom Design von Molekülen und deren Herstellungsrouten bis zum Verständnis von Reaktionsmechanismen. Burés und Larrosa haben nun ein Modell maschinellen Lernens entworfen, das Reaktionen anhand simulierter kinetischer Signaturen klassifiziert.

Die beiden Chemiker definierten 20 Klassen von Reaktionsmechanismen und berechneten für jede von ihnen das Geschwindigkeitsgesetz (siehe »Von der Reaktion zum Mechanismus«). Anschließend lösten sie die Gleichungen und erstellten daraus Millionen von Simulationen, die beschreiben, wie Reaktanden zerfallen und Produkte entstehen. Mit den solchermaßen simulierten kinetischen Daten trainierten sie einen lernenden Algorithmus darauf, die charakteristischen Signaturen jeder

Klasse von Mechanismen zu identifizieren. Daraus erhielten die Forscher ein Modell, das anhand der eingegebenen kinetischen Profile – einschließlich Daten zu den Konzentrationen zu Beginn und über die Zeit – die mechanistische Klasse einer Reaktion bestimmt.

Der Trainingsansatz mit den simulierten Daten umgeht einen kritischen Engpass: Es würde Jahre dauern, die benötigte Menge an Informationen in Laborexperimenten zu erzeugen. Darüber hinaus sind die simulierten Daten für Trainingszwecke »sauber«, da jedes kinetische Profil bereits mit einem bestimmten mechanistischen Szenario verbunden ist.

Mit einem Testsatz simulierter kinetischer Profile prüften die Autoren, ob ihr Modell jedes Reaktionsprofil der korrekten Mechanismuskategorie zuordnete. Das gelang dem Algorithmus mit einer Genauigkeit von 92,6 Prozent. Er schnitt sogar dann gut ab, wenn er absichtlich mit »verrauschten« Daten gefüttert wurde, also mit solchen, die Abweichungen von der idealen Reaktion simulieren. Für die Fachleute deutete das darauf hin, dass ihr Modell auch Informationen aus echten Experimenten richtig zuordnen würde. Denn im Labor laufen Reaktionen selten ideal ab und enthalten manchmal Verunreinigungen.

Realitäts-Check

Schließlich überprüften die Autoren ihr Modell anhand experimenteller kinetischer Profile aus bereits publizierten wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Die Mechanismen, die das lernende System vorschlug, stimmten gut mit den Schlussfolgerungen

aus den früheren kinetischen Studien überein. In einigen Fällen fand das Modell sogar mechanistische Details, die in der ursprünglichen Arbeit nicht erkannt worden waren.

Für eine schwierige Reaktion schlug es wiederum drei einander sehr ähnliche mechanistische Klassen vor. Nach Ansicht der Forscher ist das keine Schwäche, sondern eher ein Vorteil ihres Systems: Wenn das Ergebnis nicht eindeutig ausfällt, liege es nahe, dass weitere Experimente nötig sind, um den betreffenden Mechanismus zu untersuchen.

Die neue Methode automatisiert nicht nur die langwierige Ableitung mechanistischer Hypothesen aus kinetischen Untersuchungen, sondern ermöglicht es zudem, anspruchsvolle Reaktionsmechanismen kinetisch zu analysieren. Wie bei jedem technischen Fortschritt in der Datenanalyse sollte man die vorgeschlagenen mechanistischen Klassifizierungen als Hypothesen betrach-

ten, die erst noch durch Experimente bestätigt werden müssen. Es besteht immer das Risiko, kinetische Daten falsch zu interpretieren. Der Algorithmus kann jedoch den richtigen Reaktionsweg (oder mehrere mögliche Reaktionswege) sehr genau identifizieren, selbst wenn nur Daten aus wenigen Laborexperimenten vorliegen. Das könnte mehr Fachleute davon überzeugen, die Kinetik ihrer Reaktionen zu untersuchen.

Möglicherweise kann der neue Ansatz auch dazu beitragen, dass die kinetische Analyse häufiger bei der Entwicklung neuer Reaktionen zum Einsatz kommt – zumal Chemikerinnen und Chemiker zunehmend vertrauter mit maschinellen Lernalgorithmen werden. ◀

Anat Milo ist Assistenzprofessorin für physikalische organische Chemie an der Ben-Gurion-Universität des Negev in Israel.

Danilo M. Lustosa forscht als Postdoc in ihrer Gruppe.

QUELLEN

Blackmond, D.G.: Reaction progress kinetic analysis: A powerful methodology for mechanistic studies of complex catalytic reactions. *Angewandte Chemie International Edition* 44, 2005

Burés, J.: Variable time normalization analysis: General graphical elucidation of reaction orders from concentration profiles. *Angewandte Chemie International Edition* 55, 2016

Burés, J., Larrosa, I.: Organic reaction mechanism classification using machine learning. *Nature* 613, 2023

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 613, S. 635–636, 2023

Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS

SPEKTRUM PLUS-LESEREXKURSION

WALCHENSEEKRAFTWERK-BESUCHERFÜHRUNG

Das Walchenseekraftwerk ist ein 1924 in Kochel am See in Bayern in Betrieb genommenes Hochdruck-Speicherkraftwerk, das als eines der ersten Wasserkraftwerke weltweit die Prüfung zur Nachhaltigkeit nach den strengen Regeln des internationalen Verbandes der Wasserkraftwerke IHA (International Hydropower Association) absolviert.

TERMIN: **Samstag, 12. August 2023, 11:00 Uhr (Dauer ca. 1 Stunde)**

Anmeldung und weitere Vorteile:

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



ARCHÄOGENETIK

Steinzeitschmuck enthält Erbgut seiner Trägerin

Vor 20000 Jahren trug ein Mensch einen Hirschzahn am Körper. Und zwar eine Frau, wie eine neue genetische Untersuchungsmethode ergab. Der Kniff dabei: den Zahn in eine Waschmaschine geben.

► Vor ungefähr 20000 Jahren bohrte jemand ein Loch in einen kleinen Zahn eines Wapitihirschs, nicht einmal drei Zentimeter lang – vermutlich um ihn als Schmuckstück aufzufädeln und sich umzuhängen. Solche Überbleibsel aus der Steinzeit tauchen bei Ausgrabungen häufig auf. Sie verraten, womit Menschen sich schmückten. Doch wer diese Männer und Frauen genau waren, geben die Fundstücke nicht preis. Wer hielt den Zahn in Händen, drillte das Loch hinein oder legte ihn sich als Kette an?

Nun gelang es einem Team um Matthias Meyer und Elena Essel vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie (EVA) in Leipzig sowie Marie Soressi von der Universität Leiden, eine Antwort auf diese Fragen zu finden. Sie entwickelten eine neue paläogenetische Methode und stellten damit fest: Den Hirschzahn trug eine Frau am Körper. Sie gehörte einer Menschengruppe an, die damals weit im Osten Sibiriens lebte.

»Die Ergebnisse sind wirklich fantastisch«, sagt Philipp Stockhammer von der Ludwig-Maximilians-

Universität (LMU) München. »Die neuen Methoden fischen zerstörungsfrei aus Objekten altes Erbgut heraus, das einiges über die Menschen verraten kann, die diese Gegenstände nutzten«, erklärt der Archäologe, der die europäische Bronze- und frühe Eisenzeit mit naturwissenschaftlichen Methoden erforscht, aber an der aktuellen Studie der EVA-Gruppe nicht beteiligt war.

»Die Verfahren sind tatsächlich eine große Revolution und ein ganz wichtiger Meilenstein in der Paläogenetik«, meint auch Kay Prüfer. Der EVA-Experte auf dem Gebiet alter Genomforschung hat ebenfalls nicht an der Studie mitgewirkt.

LABORARBEIT In der Denisova-Höhle in Sibirien legten Archäologen einen steinzeitlichen Hirschzahn frei. Eine Genanalyse verriet, wer den Zahn einst als Schmuck trug.



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE, LEIPZIG

Ähnlich wie Gerichtsmediziner spürten die Fachleute um Matthias Meyer kleinste Erbgutreste auf. Mit dem Unterschied: Die gesuchten DNA-Spuren sind mehrere Jahrtausende alt. Dafür waren allerdings viele Jahre an Forschungsarbeit nötig. Meyer, der als Gruppenleiter in der Abteilung von Nobelpreisträger Svante Pääbo tätig ist, entwickelt Methoden, um winzigste Überreste von uraltem Erbgut zu entschlüsseln. Er und sein Team untersuchen dafür nicht nur steinzeitliche Knochen und Zähne. Denn solche Funde sind selten, und meist finden sich an ihnen keine DNA-Überbleibsel mehr, mit denen die empfindlichen Methoden der Paläogenetik noch etwas hätten anfangen können.

Vielmehr hielten Meyer und seine Gruppe anderswo Ausschau nach alten Genfragmenten – und wurden an unerwarteter Stelle fündig. Wie viele andere Biomaterialien zersetzt sich DNA rasch in Wasser, aber an Sand und Ton bleibt sie haften und ist

so vor dem Zahn der Zeit geschützt. Die beiden Stoffe wiederum lagern sich häufig im Erdreich von Höhlen ab, in denen Tiere und Menschen einst Zuflucht suchten. Tatsächlich berichtete das EVA-Team im April 2017, dass es in den Sedimenten verschiedener Höhlen das Erbgut von Hirschen, Rindern und Mammuts gefunden habe.

Schweiß, der auf Schmuck haften blieb

Viel seltener dagegen isolierten die Fachleute die DNA von Neandertalern und Denisovanern im Erdreich der Höhlen. Das überrascht nicht: Normalerweise tauchen bei Ausgrabungen erheblich mehr Überreste von Tieren als von Menschen auf, weil in der Steinzeit einfach weniger Zweibeiner als Tiere umherstreiften. Doch alle diese Lebewesen hinterließen Spuren ihres Erbguts im Boden – durch ihren Kot, ihren Urin oder ihren Schweiß. Und das EVA-Team fischte nun viele Jahrtausende

später die Genreste aus den Sedimenten.

In ähnlicher Weise kann DNA in Gegenstände gelangen, mit denen moderne Menschen, Neandertaler oder Denisovaner einst hantierten. Wie kommt man an diese Genschnipsel heran? Eine kleine Elfenbeinschnitzerei könnte den Schweiß eines Menschen und dessen darin enthaltenes Erbgut aufgesaugt haben, aber für die herkömmlichen Analysemethoden müsste eine Probe aus dem Kunstwerk gebohrt werden. Das würde den Fund nicht nur beschädigen, sondern auch spätere Untersuchungen vielleicht für alle Zeit unmöglich machen.

»Wir haben uns daher eine sanfte Technik ausgedacht, die zerstörungsfrei Kontaminationen von und aus der Oberfläche der Proben holt«, erklärt Meyer. Zu solchen Verunreinigungen gehören Schweiß oder Hautzellen sowie die darin enthaltene DNA, die durch direkten Körperkontakt in die Oberfläche eines Objekts übertragen

Spektrum LIVE

Digitaler Landschafts-Astrofotografie-Workshop

In diesem digitalen Workshop geht es um die prinzipiellen Ver- und Bearbeitungstechniken von RAW-Milchstraßenaufnahmen über Landschaften. Dazu stellt Astrofotograf Dr. Sebastian Voltmer eigenes RAW-Material für alle zum Üben und Nachvollziehen während des Workshops zur Verfügung.

Der Workshop richtet sich an Anfänger der Astrofotografie.

26. August 2023
mit Astrofotograf
Dr. Sebastian Voltmer

Infos und Anmeldung:
[Spektrum.de/live](https://www.spektrum.de/live)





MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE, LEIPZIG



VOR UND NACH DEM WASCHGANG An dem Tierzahn aus der Denisova-Höhle haftete noch Erde (links), als er geborgen wurde. Nachdem ihn die Genetiker in ihre Erbgut-Waschmaschine gelegt hatten, kam das Stück sauber wieder heraus (rechts). Im Waschwasser hatten sich dann Genfragmente verfangen.

wurde. Um diese DNA herauszufischen, entwickelte EVA-Forscherin Elena Essel eine Art Waschmaschine für archäologische Funde aus Knochen oder Zähnen.

Als Erstes geht das Objekt in den Schonwaschgang: Dabei holt eine Natriumphosphat-Pufferlösung bei einer Temperatur von 21 Grad Celsius Erbgut und anderes Material von der Oberfläche. Anschließend folgen weitere Waschgänge mit der gleichen Lösung – bei 37, 60 und 90 Grad Celsius. Je höher die Temperaturen sind, aus umso tieferen Schichten im Knochen oder Zahn extrahiert die Lösung DNA und anderes Material. Bei den Waschungen können die Funde allerdings deutlich aufhellen, weil sie von anhaftenden Sedimenten gereinigt werden. Sonst bleiben die Objekte jedoch intakt.

Essel und Meyer versuchten nun, aus dem Wasser der Waschgänge Erbgut zu isolieren. Anfangs steckten sie nur Rückschläge ein: In Artefakten aus Knochen, die zwischen den 1970er und den 1990er Jahren in der Quinçay-Höhle in Frankreich ausgegraben worden waren, fand sich zwar durchaus menschliches Erbgut. Nur stammte es von den Leuten, die bei den Grabungen die Stücke angefasst

und untersucht hatten. Hafteten jemals geringe Mengen alter DNA an den Funden, dürften sie in der Flut moderner Genschnipsel untergegangen sein.

Ein Zahn in der Tüte

Meyer und sein Team ließen sich nicht beirren, sondern suchten nach besseren Fundstücken für ihre Erbgut-Waschmaschine. Da kam ihnen ein Hirschtzahn aus der Denisova-Höhle im Süden Sibiriens gerade recht. Um Verunreinigungen zu vermeiden, hatte der Archäologe Maxim Kozlikin von der Russischen Akademie der Wissenschaften in Novosibirsk dort 2019 mit Handschuhen und Gesichtsmaske den Hirschtzahn ausgegraben. Später legte er den Anhänger, verpackt in eine Plastiktüte, auf den Schreibtisch von Svante Pääbo in Leipzig.

»Wir haben uns die Augen gerieben, weil dieses saubere Ausgraben genau das war, was uns fehlte«, erinnert sich Meyer. Daraufhin baten die Forscher ihren EVA-Kollegen Jean-Jacques Hublin, vergleichbare Artefakte auf ähnliche Art und Weise aus der Bacho-Kiro-Höhle in Bulgarien zu bergen. An jenem Fundplatz kamen die bisher ältesten Überreste

des modernen Menschen in Europa ans Licht.

Dank der behutsamen Grabungsmethode waren die Objekte deutlich geringer mit dem Erbgut heute lebender Menschen verunreinigt. Trotzdem fand das Team um Meyer an den drei Tierzähnen, die Menschen in der Bacho-Kiro-Höhle vor zirka 45000 Jahren als Schmuck getragen hatten, keine verwertbaren Spuren alter DNA. Der Anhänger aus dem Zahn eines Wapitihirschs dagegen war ein voller Erfolg: Darin steckten nicht nur alte DNA-Fragmente des Tiers, sondern auch überraschend große Mengen alten Erbguts einer Frau. Vor allem die heißeren Waschgänge lösten Genmaterial unter der porösen Oberfläche des Zahns heraus, wohin sie mit dem Schweiß gelangt sein konnten.

»Vielleicht hat die Frau den Anhänger jahrelang um den Hals oder am Handgelenk getragen«, mutmaßt Meyer. So könnte das kleine Schmuckstück lange Zeit direkt auf ihrer Haut gelegen und dabei Schweiß und DNA aufgenommen haben. Meyers Arbeitsgruppe extrahierte jedenfalls sowohl das Erbgut aus den Mitochondrien, den Kraftwerken der Zellen, als auch einen

wesentlichen Teil des Genoms aus den Zellkernen. Aus beidem konnten die Archäogenetiker weitere Informationen gewinnen. So war die Frau genetisch eng mit einer Gruppe verwandt, die als »Ancient North Eurasians« (ANE) bekannt ist. Genanalysen an Skelettüberresten ergaben, dass diese »nördlichen Eurasier« sonst viel weiter im Osten Sibiriens gelebt hatten. Allerdings waren sie weit herumgekommen: »Sie gehören wohl zu den Urahnen anderer Gruppen, die später in Sibirien lebten«, erklärt EVA-Forscher Kay Prüfer. »Das ANE-Erbgut taucht auch in den Menschen auf, die als Erste über die damals trockenengefallene Beringstraße aus dem Osten Sibiriens Amerika erreichten.«

Unvermutetes Erbgut

Den Paläogenetikern um Meyer ist es erstmals gelungen, mit den Methoden der Gerichtsmedizin zu ermitteln, wer sich den Hirschkiefer vor vielen Jahrtausenden umgehängt hat. »Die EVA-Gruppe stößt so das Tor weit auf für Analysen solcher Gegenstände, in

denen bisher niemand so recht das Erbgut von Menschen vermutet hat«, erklärt Prüfer die Bedeutung der Forschungsstudie. Auch für die Zukunft heißt das: »Erstmals lassen sich so steinzeitliche Werkzeuge und Schmuck direkt mit ihren Trägern oder Nutzern verbinden«, sagt der Paläogenetiker.

»Bisher war das nur bei Gegenständen gelungen, die den Menschen mit ins Grab gegeben worden waren«, ergänzt LMU-Archäologe Philipp Stockhammer. Überdies: Das Fundstück blieb dank der neuen Methode unversehrt. Damit das weiterhin der Fall ist, entschieden sich Meyer und seine Gruppe dazu, den Zahn nicht mit Hilfe der ¹⁴C-Methode zu datieren – auch dafür wäre eine Probe des Zahns nötig –, sondern sie bestimmten das genetische Alter von Mensch und Tier. Daraus ergab sich, dass die Frau und der Wapitihirsch vor ungefähr 20000 Jahren gelebt haben. Ein ähnliches Ergebnis mit rund 24000 Jahren erzielte die Radiokohlenstoffdatierung von Holz-

kohlestücken, die in der Nähe des Anhängers gefunden wurden. Mittels einer Erbgutanalyse könnte man demnach zumindest in einigen Fällen eine ¹⁴C-Datierung umgehen, will man nicht Teile eines Objekts für die Altersbestimmung opfern.

»Die Studie ist auf jeden Fall ein methodischer Meilenstein«, sagt Stockhammer. Damit sie Ergebnisse bringt, sollten Archäologen aber fortan ihre Funde wohl besser mit Handschuhen und Mundschutz bergen. ◀

Roland Knauer ist Wissenschaftsjournalist in Lehnin.

QUELLEN

Essel, E. et al.: Ancient human DNA recovered from a Palaeolithic pendant. *Nature* 618, 2023

Fewlass, H. et al.: A ¹⁴C chronology for the Middle to Upper Palaeolithic transition at Bacho Kiro Cave, Bulgaria. *Nature Ecology & Evolution* 4, 2020.

Slon, V. et al.: Neandertal and Denisovan DNA from Pleistocene sediments. *Science* 356, 2017

Spektrum

der Wissenschaft

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

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke 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

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

Leser- und Bestellservice: Estefanny Espinosa de Rojas, Helga Emmerich, Sabine Häuser, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de,

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

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

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

Anzeigen: E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-600

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 44 vom 1.1.2023.

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

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

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

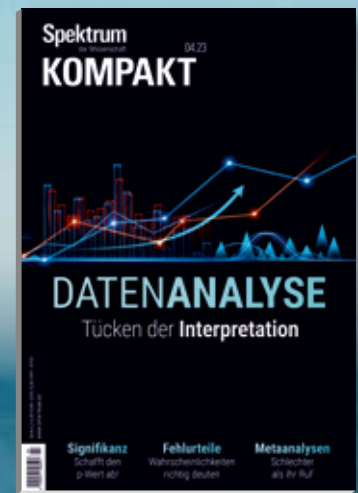
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Laura Helmuth
President: Kimberly Lau

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



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 | Tel. 06221 9126-743
[Spektrum.de/aktion/neuerscheinungen](https://www.spektrum.de/aktion/neuerscheinungen)

Die Jugend von heute ...

... gilt vielen Älteren als unfreundlich, rücksichtslos und egoistisch. Mit Recht?

» spektrum.de/artikel/2150682

Unter dem Stichwort »Jugend von heute« liefert das Internet ein Potpourri von Zitaten, von sumerischen Tontafeln über antike Philosophen bis zu modernen Zeitdiagnostikern, die unisono verkünden: Die Moral der zeitgenössischen Jugend ist eine echte Katastrophe.

Nun muss ein Gemeinplatz wie »Jugend kennt keine Tugend« ja nicht von vornherein ganz falsch sein. Verdächtig ist nur, wie hartnäckig die älteren Semester zu allen Zeiten der nachwachsenden Generation deren Nichtswürdigkeit bescheinigt haben. Das riecht nach einem stereotypen Vorurteil.

Denn wenn der gesellschaftliche Verfall tatsächlich, wie schon in den ältesten schriftlichen Zeugnissen behauptet, ein dauerhafter Trend wäre, dann müsste längst überall nackte Barbarei herrschen. Dagegen spricht, dass zivilisatorische Kenngrößen wie Alphabetisierung, Nahrungsversorgung, Lebenserwartung und Kriminalität trotz all der Probleme, mit denen sich eine rapide wachsende Menschheit herumschlägt, alles in allem eine positive Tendenz aufweisen.

Dessen ungeachtet konstatieren die meisten Menschen einen Niedergang der Lebensumstände: Früher sei alles freundlicher und ehrlicher zugegangen – einfach anständiger. Das überwältigende Vorherrschen dieser Meinung belegen die Umfragen, die der Sozialpsychologe Adam M. Mastroianni von der Columbia University in New York mit seinem Kollegen Daniel T. Gilbert von der Harvard University in Cambridge ausgewertet hat (*Nature*, DOI: 10.1038/s41586-023-06137-x, 2023).

Die Forscher stützen sich auf gut 12 Millionen Daten aus 60 Nationen, die aus den vergangenen 70 Jahren stammen. Auf Sätze wie »Glauben Sie, dass sich hier zu Lande der Zustand der moralischen Werte derzeit verbessert oder verschlechtert?« antworten die meisten Befragten, es gehe mit der Moral bergab. Dabei wird sogar eingeräumt, dass Frauen, Menschen mit Behinderungen oder Homosexuelle weniger diskriminiert werden als früher – aber das ändert nichts am generellen Pessimismus.

Im Widerspruch zur Verfallsthese stehen die Ergebnisse von Umfragen, die im Abstand von

mindestens zehn Jahren aufforderten, den jeweils gerade aktuellen moralischen Zustand einzuschätzen. Dabei zeigte sich keine Zeitabhängigkeit. Das heißt, in der Tat ändert sich die herrschende Moral gar nicht merklich. Insbesondere verfällt sie nicht.

Darin sehen Mastroianni und Gilbert den Beweis, dass es sich bei dem Eindruck, es finde ein allgemeiner Niedergang statt, um eine Illusion handelt. Aber was verursacht diese Einbildung?

Wie die Forscher vermuten, steckt dahinter eine Kombination von zwei sozialpsychologischen Mechanismen: Zum einen finden negative Informationen mehr Aufmerksamkeit, zum anderen neigen wir dazu, negative Ereignisse schneller zu vergessen.

Der Roman »Anna Karenina« von Leo Tolstoi beginnt mit dem Satz: »Alle glücklichen Familien gleichen einander, jede unglückliche Familie ist auf ihre eigene Weise unglücklich.« Das heißt, der Bericht über eine harmonische Beziehungsidylle ist weniger interessant als die Geschichte einer unerhörten Familientragödie.

Fernsehspiele konkurrieren um hohe Einschaltquoten, indem sie gleich in der ersten Einstellung die Aufmerksamkeit durch ein Gewaltverbrechen fesseln. So verstärken die Medien den Eindruck, grobe Verletzungen der Moral seien die Regel, ein ruhiger Alltag die rare Ausnahme.

Andererseits erinnern wir uns besonders deutlich an schöne Erlebnisse, während schlimme Erinnerungen eher verdrängt oder beschönigt werden. Dadurch erscheint uns die Vergangenheit in milderem Licht.

Indem beide Effekte zusammenwirken, erleben wir die Gegenwart deswegen deutlich negativer als die Vergangenheit. Früher war vermeintlich alles besser.



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

VERHALTENSFORSCHUNG

Neurobiologie der Liebe

**Kleine Nager liefern uns überraschende Erkenntnisse
darüber, wie soziale Bindungen entstehen.**

▶ spektrum.de/artikel/2150670

AUBREY M. KELLY





Steven Phelps (links) ist Direktor des Center for Brain, Behavior and Evolution an der University of Texas in Austin. An Nagetieren mit ungewöhnlichem Sozialverhalten untersucht er, wie Gehirn, Gene und Umwelt bei komplexen Verhaltensweisen zusammenwirken.

Zoe Donaldson erforscht als Assistenzprofessorin an der University of Colorado in Boulder mit neurogenetischen Methoden, wie Paarbindungen entstehen, wie sie das Gehirn verändern und wie wir über Verluste hinwegkommen. **Devanand Manoli** ist Neurowissenschaftler an der University of California in San Francisco. Mit seinem Labor leistete er Pionierarbeit, indem er die Genome von Wühlmäusen mit Hilfe von CRISPR manipulierte, um zu ergründen, wie soziale Bindungen im Gehirn codiert sind und wie sich diese Prozesse bei psychiatrischen Krankheiten verändern.

AUF EINEN BLICK

Zärtliche Bande bei Mäusen und Menschen

- 1** Die in Nordamerika heimische Präriewühlmaus gehört zu den wenigen Nagetierarten, die monogam leben. Sie avancierte daher zum Modellorganismus für soziale Beziehungen.
- 2** Eine wichtige Rolle bei der Paarbindung spielen die Hormone Oxytozin und Vasopressin – auch beim Menschen. Sie allein können das Phänomen jedoch nicht erklären.
- 3** Vermutlich wirken evolutionär alte Belohnungszentren des Gehirns mit, um das menschliche Gefühl der Liebe zu erzeugen.

ZWEI, DIE SICH MÖGEN

Präriewühlmäuse weisen ein bei Nagetieren ungewöhnliches Verhalten auf: Sie wählen einen festen Partner, mit dem sie ihr Nest teilen und die Jungen gemeinsam aufziehen. Diese monogame Beziehung kann ein Mäuseleben lang halten.



▶ In den vergangenen zwei Millionen Jahren haben riesige Eisschilde die Landschaft im Mittleren Westen der USA flach wie einen Wetzstein geschliffen. Heute erstrecken sich dort bis zum Horizont Maisfelder, doch immer wieder finden sich auch Überreste der Prärie, die einst das Zentrum des US-Bundesstaats Illinois bedeckte. In einem Herbst vor knapp einem halben Jahrhundert kontrollierte der junge Ökologe Lowell Getz von der University of Illinois seine inmitten von Gras und Klee versteckten Fallen. Dabei fiel ihm auf, dass sich eine der von ihm gefangenen Nagetiere anders als die übrigen verhielt: Bei der Präriewühlmaus tauchten immer wieder bestimmte Paare zusammen in den Fallen auf. Laut Schätzungen der Zoologin Devra Kleiman (1942–2010) aus den 1970er Jahren leben nur etwa drei Prozent aller Säugetierarten monogam. Die von Getz und seinen Studenten gesammelten Daten deuteten darauf hin, dass *Microtus ochrogaster* dazugehört.

Getz war nicht der erste Wissenschaftler, der bei Präriewühlmäusen ein monogames Verhalten vermutete. Seine Arbeit weckte jedoch die Aufmerksamkeit der Biologin Sue Carter, und zusammen begannen die Teams der beiden, das gesamte Spektrum des Sozialverhaltens der Wühlmäuse und das seiner zu Grunde liegenden Hormone sowohl im Labor als auch in freier Wildbahn zu dokumentieren. In ihren Untersuchungen aus den 1980er und 1990er Jahren fanden sie heraus, dass Männchen und Weibchen ein Nest miteinander teilen, ihre Jungen partnerschaftlich aufziehen und ihr Territorium gemeinsam verteidigen. Als Maß für die »Partnerpräferenz« entwickelte Carters Arbeitsgruppe einen simplen Verhaltenstest: Das Versuchstier sollte sich zwischen seinem Gefährten und einem Fremdling entscheiden, die jeweils in zwei benachbarten Käfigen saßen. Präriewühlmäuse, die bereits eine Paarbindung eingegangen waren, kuschelten bevorzugt mit ihrem vertrauten Partner. Jene Bindung, die ein Mäuseleben lang anhalten kann, kommt nach einer geradezu hemmungslos ausgiebigen Paarung zu Stande.

Mit der Präriewühlmaus als Versuchstier lernen Forscher dank moderner neurobiologischer und genetischer Methoden, wie soziale Bindungen geknüpft werden, wie frühe Lebensphasen spätere Beziehungen prägen und warum es uns so weh tut, wenn diese zerbrechen. Natürlich sind Wühlmäuse keine Menschen. Und so werfen solche Erkenntnisse denn auch die Frage auf, wie ein strubbeliges, tennisballgroßes Nagetier, das regelmäßig mit einem Maulwurf, einer Maus oder einer Ratte verwechselt wird, zu einem Stellvertreter für die Wonnen der Liebe und den Schmerz des Verlustes avancieren konnte. Die Antwort verrät uns ebenso viel über den Fortschritt der Wissenschaft wie über unser eigenes Seelenleben.

Die Evolution der Monogamie bei der Präriewühlmaus führte Getz auf das spärliche Nahrungsangebot der gleichförmig flachen, grasbedeckten Umwelt zurück, das die Tiere dazu zwingt, weit verstreut zu leben. Solche Bedingungen machen es den Männchen unmöglich, sich erfolgreich mehreren Weibchen zu widmen, wie es ande-

re Nagetierarten tun. Vielmehr erscheint es sinnvoller, sich mit nur einer Gefährtin niederzulassen und ein gemeinsames Revier zu verteidigen. Die Weibchen gewinnen so einen Partner, der sie bei der Brutpflege unterstützt und Eindringlinge abwehrt. Carters Gruppe entdeckte zudem, dass das Hormon Oxytozin, ein lange bekannter Regulator von Geburt, Milchbildung und mütterlicher Fürsorge, essenziell für den Aufbau von Bindungen ist. Ein ähnlicher Botenstoff, Vasopressin, entpuppte sich bald darauf als weiterer Mitspieler beim Bindungsverhalten der Präriewühlmaus.

Oxytozin, Vasopressin und andere eng mit ihnen verwandte Hormone sind in der Natur allgegenwärtig und bei fast sämtlichen Tierspezies nachgewiesen worden. Wenn diese Stoffe aber in einem derart breiten Artenspektrum zu finden sind, deren Vertreter größtenteils nicht monogam leben, reicht ihr Vorhandensein allein offensichtlich nicht aus, um eine Paarbindung zu festigen. Doch wie und warum beeinflussen diese Hormone das Bindungsverhalten?

Die Antwort liegt in der Art und Weise, in der sie Veränderungen im Gehirn hervorrufen. Hormone sind meist kurze Eiweißverbindungen, auch Peptide genannt, die mit großen Proteinen, den Rezeptoren, wechselwirken. Bindet ein spezifisches Hormon an sein Rezeptorprotein, modifiziert es dessen Form, was wiederum Veränderungen im Zellinneren auslöst.

Gleiche Belohnungsschaltkreise bei Drogen und Paarbindung

Da Oxytozin und Vasopressin bei vielen Tierspezies vorkommen, aber nur bei einigen eine enge Bindung fördern, schienen artspezifische Unterschiede in der Verteilung ihrer Rezeptoren eine plausible Erklärung für dieses Phänomen zu sein. In den 1990er Jahren entdeckten Thomas Insel und seine Kollegen vom US-amerikanischen National Institute of Mental Health, dass sich die Oxytozin- und Vasopressinrezeptoren bei der Präriewühlmaus und ihrer ebenfalls monogam lebenden Verwandten, der Kiefernwühlmaus (*Microtus pinetorum*), in anderen Hirnregionen befinden als bei der promiskuitiven Wiesen- (*M. pennsylvanicus*) und Rocky-Mountains-Wühlmaus (*M. montanus*). Während monogame Wühlmäuse eine Vielzahl dieser Hormonrezeptoren in Bereichen des Belohnungsschaltkreises wie dem Nucleus accumbens oder dem ventralen Pallidum aufweisen, sind bei den promiskuitiven Spezies hier kaum Rezeptoren vorhanden. Dieselben Areale beschäftigen Neurowissenschaftler schon seit Längerem im Zusammenhang mit Drogenmissbrauch. Und so hieß es bald darauf in den Schlagzeilen: Liebe macht süchtig.

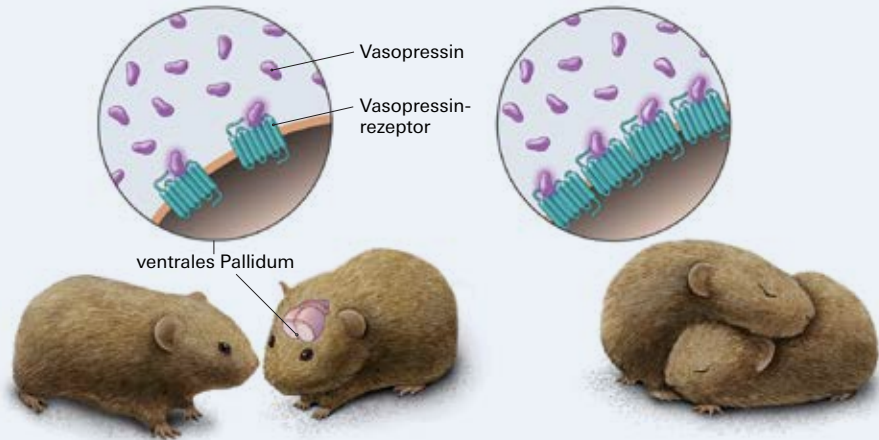
Die Befunde untermauerten die Vorstellung, dass verschieden verteilte Hormonrezeptoren für das unterschiedliche Verhalten von monogamen und promiskuitiven Wühlmäusen verantwortlich sein könnten. Um jedoch im Detail zu verstehen, wie Hormonrezeptoren das Bindungsverhalten steuern, galt es, die für die Rezeptoren codierenden Gene zu manipulieren.

Enge Bindungen

Untersuchungen an der monogamen Präriewühlmaus (*Microtus ochrogaster*) und der promiskuitiven Wiesenwühlmaus (*M. pennsylvanicus*) brachten Licht in die Neurobiologie des Bindungsverhaltens. Dabei konnten Forscher sowohl Hormone und ihre Rezeptoren identifizieren, die das Knüpfen von sozialen Beziehungen gestalten, als auch Hirnregionen und spezifische neuronale Schaltkreise, die an dem Prozess beteiligt sind

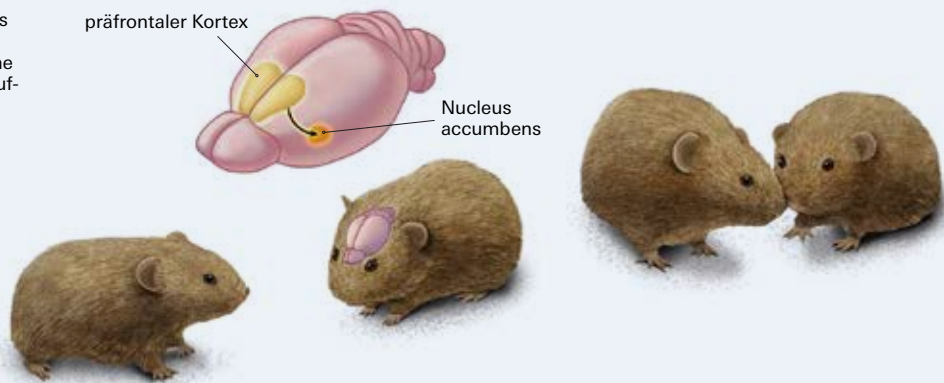
Fallstudie 1

Das Hormon Vasopressin, das die Paarbindung bei der Präriewühlmaus reguliert, kommt auch bei der Wiesenwühlmaus vor. Im Gegensatz zur Letzteren besitzt die Präriewühlmaus jedoch eine große Zahl an Vasopressinrezeptoren in einer bestimmten Hirnregion, dem ventralen Pallidum. Als Wissenschaftler eine zusätzliche Genkopie für den Vasopressinrezeptor in das ventrale Pallidum von Wiesenwühlmäusen einschleusten, zeigten diese sonst solitären Tiere plötzlich einen Hang zum Kuschneln.



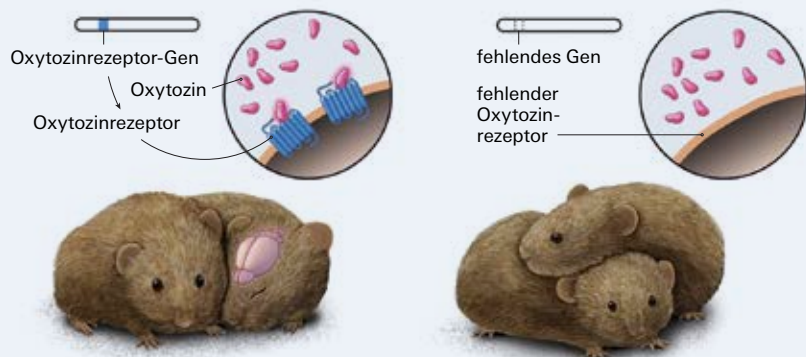
Fallstudie 2

Der präfrontale Kortex beeinflusst den Belohnungsschaltkreis im Gehirn durch seine Verschaltung mit dem Nucleus accumbens. Wird er bei einer Präriewühlmaus, in deren Nähe sich ein potenzieller Partner aufhält, experimentell aktiviert, scheint sich der Nager zum Artgenossen hingezogen zu fühlen. Dabei feuern die Belohnungsneurone im Nucleus accumbens, bevor sich ein Tier dem anderen nähert. Die Zahl der auf den Partner reagierenden Neurone steigt, wenn sich die Bindung mit der Zeit festigt.



Fallstudie 3

Das Hormon Oxytozin galt lange Zeit als entscheidend für das Ausbilden von Bindungen bei Präriewühlmäusen – und Menschen. Doch unerwarteterweise zeigen Wühlmäuse, deren Oxytozinrezeptoren gentechnisch entfernt wurden, keine Beeinträchtigung ihres Bindungsvermögens. Wie die Tiere trotz Abwesenheit der Rezeptoren Beziehungen eingehen können, ist noch unklar. Vermutlich kompensieren andere Gene oder neuronale Signalwege den Mangel.



In den 1960er Jahren, noch bevor sich Ökologen Gedanken über das Sozialleben der Präriewühlmäuse machten, gelang Virologen eine Entdeckung, die schließlich zu einem neuen Werkzeug für die Gen-, Hirn- und Verhaltensforschung führen sollte: Als sie die DNA von Adenoviren untersuchten – Erregern von meist harmlosen Erkältungen –, stießen die Wissenschaftler in ihren Proben auf virusähnliche Partikel, die sie Adeno-assoziierte Viren (AAV) nannten. Während ein Virus für seine Reproduktion auf eine Wirtszelle angewiesen ist, benötigt ein AAV sowohl eine Zelle als auch die Koinfektion mit einem Adenovirus, um sich zu vermehren – es ist sozusagen der Parasit eines Parasiten. Infiziert ein AAV eine menschliche Zelle, in der kein Adenovirus vorhanden ist, legt es sich einfach so lange auf die Lauer, bis ein solches vorbeikommt.

Die Tatsache, dass AAV in das Zellinnere eindringen und dort friedlich existieren können, macht sie zu exzellenten Vehikeln, um DNA in Zellen einzuschleusen und so deren Mechanismen zu verändern. In den 1990er Jahren begannen Forscher, per gentechnisch hergestellter AAV-Konstrukte die Neurone von Mäusen und Ratten zu manipulieren, um so deren Funktion zu ergründen. Es dauerte nicht lange, bis sich herausstellte, dass die neu entwickelten molekularen Werkzeuge sich ebenso erfolgreich bei Wühlmäusen einsetzen lassen. Um die Rolle von Hormonen bei der Paarbindung zu studieren, verpflanzte das Team um Larry Young von der Emory University in Atlanta mittels AAV-Verfahren eine zusätzliche Genkopie für den Vasopressinrezeptor in das ventrale Pallidum der Wiesenwühlmaus. Daraufhin erhöhte sich hier der Rezeptorgehalt, und in der Folge legten die normalerweise einzelgängerischen, promiskuitiven Nager eine neue Bereitschaft zum Kuschneln mit einem Partner an den Tag. Youngs Arbeiten verdeutlichten, dass die Dichte von Vasopressinrezeptoren in den Belohnungsschaltkreisen des Gehirns die Verhaltensunterschiede zwischen monogamen und promiskuitiven Wühlmäusen zumindest zum Teil erklärte (siehe »Enge Bindungen«).

Das AAV-Verfahren hat es Wissenschaftlern zudem ermöglicht, die Entstehung sozialer Bindungen in Echtzeit zu beobachten. Nachdem man das Gen für ein durch Licht aktivierbares Protein in einer Weise modifiziert hatte, dass es die elektrische Erregung bestimmter Neurone steuern konnte, transferierten Neurobiologen es mit Hilfe eines AAV in den präfrontalen Kortex – eine Hirnregion, die auf Grund ihrer Verbindung zum Nucleus accumbens das Belohnungssystem beeinflusst. Wie die Arbeitsgruppe von Robert Liu von der Emory University 2017 zeigen konnte, reichte eine Aktivierung der in diesem Hirnareal befindlichen Neurone bereits aus, um bei einer Wühlmaus, in deren Nähe sich ein potenzieller Partner befand, eine Präferenz für diesen zu erzeugen. Ebenfalls unter Einsatz von AAV schleuste durch ein von uns (Donaldson) geleitetes Forscherteam in das Gehirn von Wühlmäusen das Gen für ein Protein ein, das bei Aktivität eines Neurons aufleuchtet. Mit winzigen, am Kopf der Tiere befestigten Mikroskope konnten wir so beobachten,

was im Gehirn einer Maus passiert, wenn sie eine Bindung eingeht: Kurz bevor das Tier sich einem Partner nähert, regen sich die Belohnungsneurone im Nucleus accumbens. Bemerkenswerterweise nimmt auch die Zahl der auf den Partner reagierenden Hirnzellen zu, wenn sich die Beziehung mit der Zeit verfestigt.

Mit dem Aufkommen einer neuen DNA-Editiermethode vor einem Jahrzehnt erhielten Forscher eine nie da gewesene Kontrolle über Gene und deren Tätigkeiten: CRISPR (ein Akronym für »clustered regularly interspaced short palindromic repeats«) stellt die Basis für ein molekulares Skalpell dar, das DNA an definierten Stellen schneidet. Das freilich etwas aufwändige und kostspielige Verfahren hat unser bisheriges Wissen über das so genannte Liebeshormon Oxytozin ins Wanken gebracht.

Es geht auch ohne Oxytozin

Jahrzehntelange Forschungen hatten die Rolle von Oxytozin bei der Paarbindung von Präriewühlmäusen bestätigt, und etliche Studien deuteten darauf hin, dass das Hormon gleichfalls bei zwischenmenschlichen Beziehungen über die Belohnungsschaltkreise mitmischt. Es erschien daher viel versprechend, als einer von uns (Manoli) zusammen mit weiteren Kollegen das für den Oxytozinrezeptor codierende Gen in Präriewühlmausembryonen mit Hilfe von CRISPR entfernte. Wir erwarteten, dass die genetisch modifizierten Tiere ein beeinträchtigtes Bindungsvermögen aufweisen würden. Doch zu unserer Überraschung kam es nicht so: Jene Präriewühlmäuse, die keine Oxytozinrezeptoren mehr besaßen, entwickelten gleichfalls Vorlieben für gewisse Partner wie ihre nicht manipulierten Artgenossen.

FUTTERSUCHE Pflanzensamen, Gräser und Wurzeln gehören zur bevorzugten Nahrung der Wiesenwühlmaus.



**DIE KIEFERNWÜHLMAUS
ist eng mit der Wiesen-
wühlmaus verwandt und lebt
ebenfalls monogam.**



MELINDA HANNEY / STOCK.ADOBE.COM

Wie kann das sein? Ehrlich gesagt: Wir wissen es nicht. Es besteht durchaus die Möglichkeit, dass im Lauf der Embryonalentwicklung andere Gene oder neuronale Signalwege das Fehlen der Oxytozinrezeptoren kompensieren. Uns ist bekannt, dass neben Oxytozin, Vasopressin und ihren Rezeptoren noch zahlreiche Gene den Prozess der Paarbindung beeinflussen. Wie bei einer Sinfonie, die nicht für eine kleine Gruppe von Musikern, sondern für ein ganzes Orchester komponiert wurde, gibt es hier zahlreiche Mitwirkende. Die Interpretation dieses komplexen Werks wird unser Verständnis von Verbundenheit und der ihr zu Grunde liegenden Mechanismen weiter vertiefen.

So wichtig die Gene für Oxytozin und Vasopressin sowie deren Rezeptoren auch sein mögen, sie machen offensichtlich nur einen Teil der Geschichte aus. Mit neuen Methoden versuchen Fachleute die Wissenslücken zu schließen. Die Fortschritte bei der Gensequenzierung ermöglichten in den letzten Jahrzehnten, die in jeder beliebigen Hirnregion aktiven Erbfaktoren vollständig zu quantifizieren. Eine solche genomweite Suche nach Genen und anderen DNA-Sequenzen eröffnet neue Perspektiven, da sie über den kleinen Kreis an bereits bekannten Kandidaten hinausgeht, die für das Bindungsvermögen eine Rolle spielen.

Dank solcher Studien wissen wir, dass sich die neuronalen Genaktivitäten zwischen monogamen Präriewühlmäusen und promiskuitiven Wiesenwühlmäusen unterscheiden – und zwar bereits vor einer sich entwickelnden Paarbindung, so als ob die Gehirne von vornherein auf das spezifische Sozialverhalten eingestellt seien. Nach wiederholten Paarungen schaltet sich eine Untergruppe von Genen an, die für Lernvorgänge und Gedächtnisleistungen wichtig sind – eine erwartbare Neuvernetzung beim Wechsel vom Singledasein zum Zusammenleben mit einem festen Partner. Außerdem regen sich bei der Vertiefung einer Bindung spezifische Gene im Belohnungssystem des Gehirns. Diese Veränderungen im Aktivierungsmuster sind jedoch nach einer längeren Trennung reversibel.

Genauso, wie verbesserte Methoden in der Gensequenzierung uns neue Sichtweisen auf die DNA und deren Funktion eröffneten, haben Fortschritte in der mikroskopischen Analyse biologischer Gewebe unseren Blick auf das Gehirn erweitert. Um die Mikroanatomie zu studieren, mussten Fachleute bislang sehr dünne Schnitte anfertigen. Heute ist man dagegen in der Lage, Gewebe durchsichtig zu machen, so dass wir ein gesamtes Gehirn abbilden können, ohne es zerschneiden zu müssen. Ähnlich wie gesamtgenomische Analysen erlaubt dieses Verfahren einen ungetrübten Blick auf die Vorgänge im

Gehirn. Durch das Aufspüren eines bei neuronaler Aktivität gebildeten Proteins in transparenten Gehirnen erstellte eine von uns (Phelps) zusammen mit Pavel Osten vom Cold Spring Harbor Laboratory und weiteren Mitarbeitern eine umfassende Karte von Hirnregionen, die sich regen, sobald aus dem Paarungsakt bei Präriewühlmäusen eine Bindung hervorgeht. Die Hirnkarte bestätigt, dass bei der Paarbindung Belohnungsschaltkreise beteiligt sind; es scheinen dabei aber auch zahlreiche andere Hirnareale mitzumischen. Offensichtlich folgt die neuronale Aktivität bei Männchen und bei Weibchen einem Signalweg, der bekanntermaßen bei sexuellen Reaktionen eine wichtige Rolle spielt. Diese Signalkaskade löst in fast 70 verschiedenen Hirnbereichen einen Aktivitätssturm aus, in dessen Verlauf sich das Gehirn für die Ausbildung einer Bindung neu vernetzt. Und wie Sue Carter schon vor Jahrzehnten postuliert hat, setzt offenbar der Geschlechtsakt selbst diese Neuvernetzung in Gang.

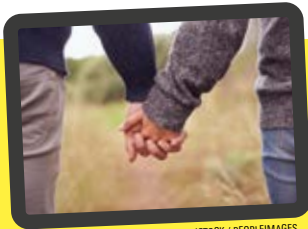
Das Bedürfnis nach Liebe

Ist eine Bindung geknüpft, konzentriert sich die neuronale Aktivität auf einen sehr viel kleineren Schaltkreis. Verbindungen zwischen der Amygdala und dem Hypothalamus – für emotionales Lernen und Hormonausschüttung bedeutsame Hirnregionen – fangen an zu arbeiten. Da dieselben Verschaltungen auch bei nichtsexuellen Sozialbeziehungen von Labormäusen mitwirken, scheint es über verschiedene Mäusearten und Interaktionsformen hinweg eine Art gemeinsame Grundlage für soziale Bindungen zu geben. Insgesamt könnten uns diese Forschungsansätze einen vollständigen Katalog jener beteiligten Gene und Hirnregionen liefern, die einerseits für das Knüpfen und den Fortbestand von Bindungen sorgen, es andererseits aber auch erlauben, sich nach einer gewissen Zeit wieder zu trennen.

Mitte des 20. Jahrhunderts postulierten der britische Psychiater John Bowlby (1907–1990) und die US-amerikanisch-kanadische Psychologin Mary Ainsworth (1913–1999) auf Basis von Beobachtungen aus der Verhaltensforschung, dass das Bedürfnis eines Kindes nach Liebe eine Grundfeste der menschlichen Biologie darstellt. Laut Bowlby bilden unsere persönlichen Bindungen an Bezugspersonen einen entwicklungsgeschichtlich adaptiven Mechanismus unseres Gehirns, der uns hilft, unsere Kindheit erfolgreich zu durchleben. Bowlbys und Ainsworths Bindungstheorie galt damals als radikaler Ansatz, doch sie wurde seither von Wissenschaftlern kontinuier-

lich erweitert, um nicht nur die elterliche Fürsorge beim Menschen zu erklären, sondern auch Freundschaften, romantische Beziehungen sowie den Schmerz, den Menschen empfinden, wenn diese zerbrechen.

Die physiologischen Vorgänge bei der Paarbindung von Präriewühlmäusen liefern ein konkretes Beispiel dafür, wie solch ein evolviertes Nervensystem aussehen könnte. Demnach bedarf es einer Verknüpfung von Sinneseindrücken mit dem Gefühl des Begehrens, damit Bindungen entstehen können. Belohnungsempfindungen veranlassen die Wühlmäuse, nah beieinanderzubleiben und sich aneinanderzuschmiegen. Es gibt offenbar Gene für die Bildung von Schaltkreisen, die das Erlernen der Identität eines neuen Partners steuern, Bindungen stabilisieren und Verlust Erfahrungen auslösen. Um ihre Aufgaben zu erfüllen, müssen sie – in einer Art und Weise, die wir noch nicht vollkommen verstehen – mit der Fähigkeit des Gehirns interagieren, Erinnerungen und Emotionen zu erzeugen.



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/partnerwahl

Das soll nicht etwa heißen, dass die Paarbindungserfahrung von Präriewühlmäusen exakt dem menschlichen Erleben von Liebe gleicht. Aufbauend auf den Erkenntnissen, die uns die Nagetiere lieferten, äußerten Neuropsychologen die Vermutung, dass Emotions- und Belohnungszentren mit anderen Hirnregionen, die etwa Empathie und Einfühlungsvermögen fördern, zusammenwirken, um in uns das überschwängliche Gefühl der Verliebtheit zu erzeugen. Demnach besitzt romantische Liebe einen emotionalen Kern, der den Gefühlslebnissen anderer Tiere ähnelt, aber durch unser komplexes Verständnis für uns selbst und unsere Lebenspartner bereichert wird.

Hiervon inspirierte Untersuchungen untermauern die Vergleichbarkeit von Mensch und Wühlmaus. Liebe stellt eine so essenzielle menschliche Gefühlserfahrung dar, dass Wissenschaftler lange Zeit annahmen, ihr biologischer Ursprung müsse in unserer Hirnrinde, dem mutmaßlichen Denkkern, liegen. Dieses Hirnareal hat sich im Lauf der Primatenevolution beträchtlich vergrößert – was zeigt, welche wesentliche Rolle es für den Erfolg unseres Zweigs im Säugetierstammbaum gespielt hat. Die Arbeiten an Präriewühlmäusen brachten Neuropsychologen allerdings dazu, die Entwicklungsgeschichtlich

älteren Hirnstrukturen jener Belohnungsregionen genauer unter die Lupe zu nehmen, die an der Bindung bei Präriewühlmäusen beteiligt sind. So korreliert bei einer in einer festen Beziehung lebenden Versuchsperson der Grad der Verliebtheit mit der zu den Belohnungssystemen fließenden Blutmenge, wenn sie sich Fotos ihres Partners anschaut. Desgleichen wird beim Händchenhalten der Nucleus accumbens aktiviert – eine der Hirnregionen, in denen bei Präriewühlmäusen die Rezeptoren für Oxytozin und Vasopressin sitzen.

Unser Wissen über die hormonellen Regulatoren zwischenmenschlicher Zuneigung deckt sich offenbar ebenfalls mit den Erkenntnissen zur Paarbindung bei Präriewühlmäusen. Auch wir Menschen werden bei einer zärtlichen Liebkosung oder beim Orgasmus von einem Oxytozinschwall durchflutet. Doch es ist ein vielseitiges Hormon: Sein Pegel steigt gleichermaßen an, wenn wir in die großen Augen eines Hundewelpen blicken.

Wissenschaftler hoffen darauf, das Phänomen der menschlichen Bindung eines Tages gut genug zu verstehen, um eingreifen zu können, wenn sie Schmerz bereitet – etwa bei chronischer Einsamkeit oder erdrückender Trauer. Medikamente, die den Effekt von Oxytozin und Vasopressin imitieren, konnten jedoch die Erwartungen in ihr therapeutisches Potenzial bislang nicht erfüllen. Und wie wir erkennen mussten, sind selbst bei Präriewühlmäusen die der Bindung zu Grunde liegenden Mechanismen noch nicht vollständig geklärt.

Für ein komplettes Verständnis müssen wir vielseitige Disziplinen wie Ökologie, Evolutionsforschung, Neurowissenschaft und Molekulargenetik unter einem Dach vereinen, die allesamt sich ergänzende Antworten auf die Frage liefern, wie und warum soziale Bindungen entstehen. Und wir brauchen Grundlagenforschung. Dieselben wissenschaftlichen Fortschritte, welche die Präriewühlmaus zu einem derart spannenden Studienobjekt für das Bindungsverhalten werden ließen, ebnet ebenso bei anderen Tierarten den Weg zu neuen Forschungsgebieten, wie zum Beispiel zur Brutpflege bei Pfeilgiftfröschen oder zur Kommunikation bei Flughunden. Das in solchen Studien gewonnene Wissen ist nicht nur um seiner selbst willen wertvoll: Weitere Spezies und zusätzliche Methoden eröffnen uns gleichfalls neue Blickwinkel auf das Leben – und auf die Liebe. ◀

QUELLEN

Amadei, E.A. et al.: Dynamic corticostriatal activity biases social bonding in monogamous female prairie voles. *Nature* 546, 2017

Berendzen, K.M. et al.: Oxytocin receptor is not required for social attachment in prairie voles. *Neuron* 111, 2023

Getz, L.L. et al.: The mating system of the prairie vole, *Microtus ochrogaster*: Field and laboratory evidence for pair-bonding. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 8, 1981

Scribner, J.L. et al.: A neuronal signature for monogamous reunion. *PNAS* 117, 2020



Seit
2010

Sie möchten Lehrstühle oder Gremien mit Frauen besetzen? Sie suchen Expertinnen, Gutachterinnen oder Rednerinnen?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 3.700 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

www.academia-net.org

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

Mit Darwin gegen die Antibiotikakrise

Antibakterielle Arzneistoffe verlieren zunehmend an Wirkung, weil die Mikroben dagegen resistent werden. Das lässt sich verhindern, indem man die Evolution der Bakterien gezielt steuert und ausnutzt.

» spektrum.de/artikel/2150673



Hinrich Schulenburg arbeitet als Professor für Evolutionsbiologie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Er leitet die Max-Planck-Fellow Gruppe »Antibiotikaresistenzevolution«.

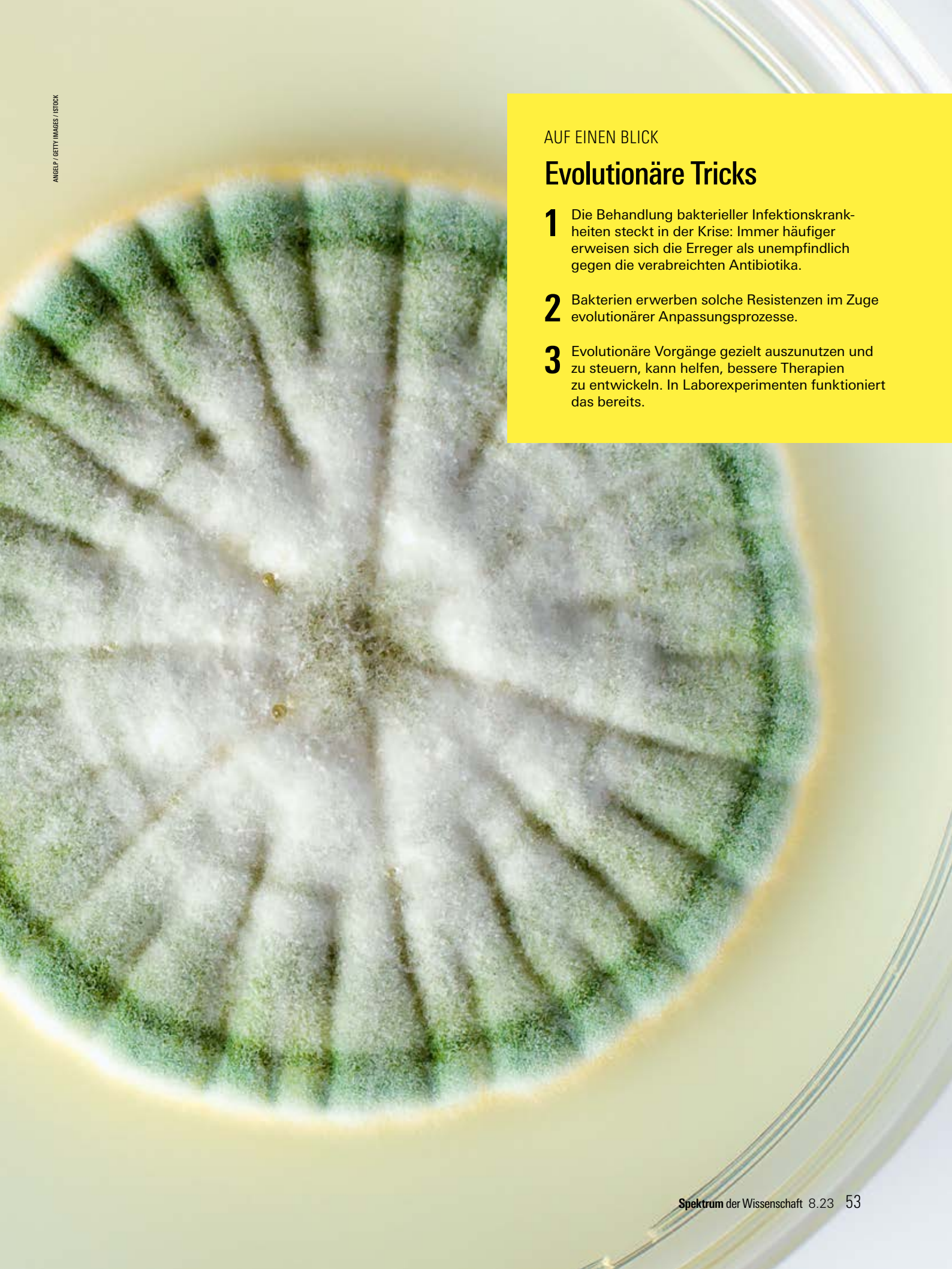
► An einem der ersten heißen Sommertage geht Ann-Kathrin mit ihren Freunden im Baggersee schwimmen und zieht sich dort eine Ohreninfektion zu. Kurz darauf beginnen die Schmerzen: zunächst nur links, dann beidseitig. Ann-Kathrin sucht eine HNO-Praxis auf, wo ihre Ohren gereinigt werden. Als das nicht hilft, bekommt sie Tropfen verschrieben mit dem Wirkstoff Ciprofloxacin, einem Antibiotikum aus der Gruppe der Fluorchinolone. Kurzzeitig bessert sich ihr Zustand, dann aber kehrt der Schmerz zurück. Weitere Untersuchungen ergeben, dass sie sich mit multiresistenten Bakterien der Spezies *Pseudomonas aeruginosa* infiziert hat, die unempfindlich gegen mehrere Arzneimittel geworden sind.

Der Fall Ann-Kathrins steht beispielhaft für viele. Infektionen mit multiresistenten Keimen sind weltweit auf dem Vormarsch und stellen die Gesundheitssysteme vor immer größere Herausforderungen. Das geht aus Erhebungen etwa der Weltgesundheitsorganisation oder des

Robert Koch-Instituts hervor. Wie konnte es dazu kommen?

Krankheitserreger bedrohen den Menschen seit jeher. Hierzu gehören Viren, Bakterien, Pilze und einzellige Parasiten. Im Lauf der Jahrtausende haben sie immer wieder Infektionswellen verursacht, sowohl weltweite (Pandemien) als auch örtlich-regional beschränkte (Epidemien). Ein historisches Beispiel hierfür ist die schwarze Pest, die – ausgelöst vom Bakterium *Yersinia pestis* – vor allem im 14. Jahrhundert wütete und etwa ein Drittel der europäischen Bevölkerung das Leben kostete. Wiederholte Pockenausbrüche in Amerika, die nach Ankunft der Spanier im 16. Jahrhundert aufflammten, rafften Abermillionen Indigene dahin (siehe »Spektrum« April 2021, S. 34). Und Anfang des 20. Jahrhunderts forderte die Spanische Grippe weltweit zirka 50 Millionen Tote (siehe »Spektrum« November 2020, S. 28). Die Covid-19-Pandemie schließlich hat unser Leben in den zurückliegenden Jahren erheblich geprägt und mit rund sieben Millionen Opfern eine Spur des Todes gezogen.

NÜTZLICHER SCHÄDLING Der Schimmelpilz *Penicillium notatum* (hier in einem Kulturgefäß wachsend) produziert das Antibiotikum Penicillin.



AUF EINEN BLICK

Evolutionäre Tricks

- 1** Die Behandlung bakterieller Infektionskrankheiten steckt in der Krise: Immer häufiger erweisen sich die Erreger als unempfindlich gegen die verabreichten Antibiotika.
- 2** Bakterien erwerben solche Resistenzen im Zuge evolutionärer Anpassungsprozesse.
- 3** Evolutionäre Vorgänge gezielt auszunutzen und zu steuern, kann helfen, bessere Therapien zu entwickeln. In Laborexperimenten funktioniert das bereits.

Noch im 19. Jahrhundert gehörte es zum Alltag, dass in den Familien nicht alle Geschwister überlebten: 40 bis 50 Prozent der Kinder starben vor Vollendung der Pubertät, meist an Infektionskrankheiten. Im Jahr 1921 erlagen rund 16000 Kinder in den USA allein der Diphtherie; hinzu kamen die Opfer der Kinderlähmung, des Keuchhustens, der Pocken und vieler weiterer Krankheiten (siehe »Spektrum« August 2021, S. 12). Diese Situation hat sich auf Grund zweier Innovationen verbessert: Zum einen wegen des Einführens der Massenimpfungen ab dem späten 19. Jahrhundert, die virale Erkrankungen stark zurückdrängen. Zum anderen wegen der Entwicklung antibiotischer Arzneistoffe im 20. Jahrhundert, die gegen bakterielle Keime wirken. Beide gehören zu den großen Erfolgsgeschichten der Medizin, da sie in den zurückliegenden Jahrzehnten hunderte Millionen infektionsbedingte Todesfälle verhindert haben.

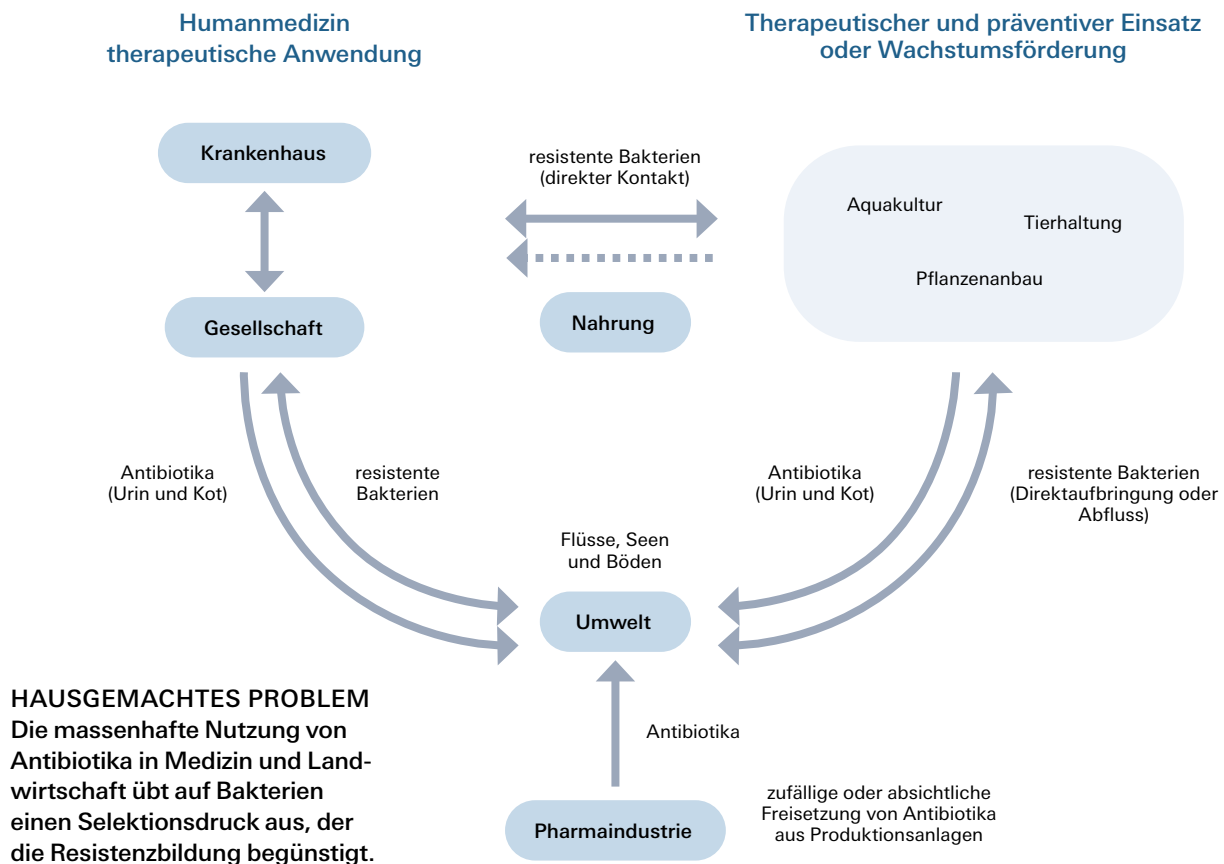
Ein Zufallsfund, der Leben rettete

Antibiotika sind natürlich vorkommende oder synthetische Substanzen, die Bakterien abtöten beziehungsweise an der Vermehrung hindern. Schon im späten 19. Jahrhundert begannen Forscher zu untersuchen, wie sich bakterielle Infektionen ursächlich bekämpfen lassen. Eines der ersten Antibiotika war Penizillin, das der britische Mediziner Alexander Fleming (1881–1955) im Jahr 1928 zufällig entdeckte. Er bemerkte, dass ein Schimmelpilz, der eine seiner Bakterienkulturen in der Petrischale

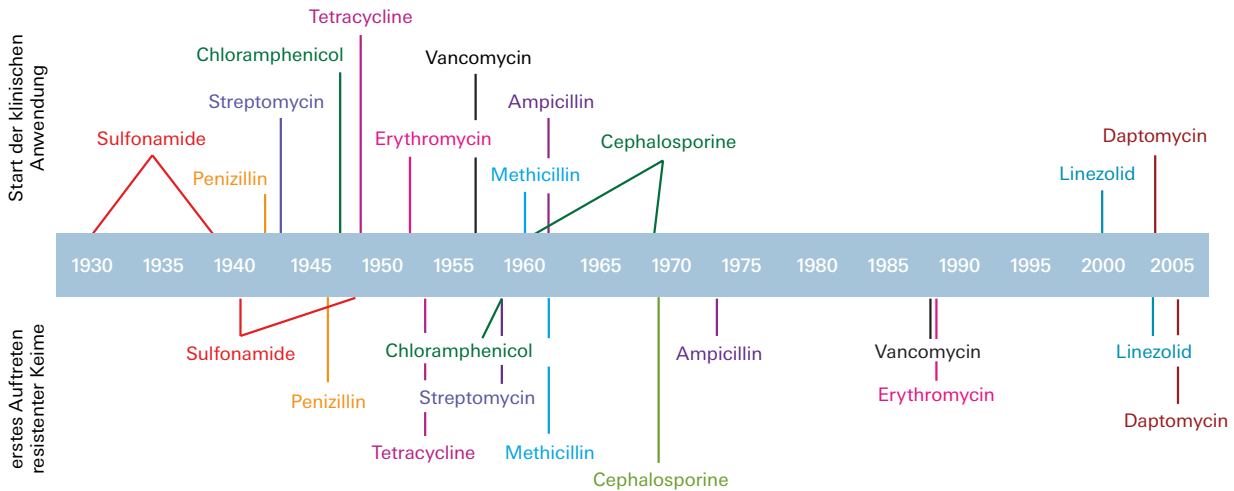
kontaminiert hatte, das Wachstum der Mikroben hemmte. Weitere Nachforschungen ergaben, dass der Pilz mit der Artbezeichnung *Penicillium notatum* eine Substanz produziert, die Mikroorganismen abtötet. Der Stoff erhielt den Namen Penizillin.

Zu Beginn war es schwierig, Penizillin in großen Mengen herzustellen. Daher diente als erstes massenhaft eingesetztes Antibiotikum eine synthetische Verbindung aus der Gruppe der Sulfonamide, die ursprünglich als Farbstoff in der Textilindustrie eingesetzt worden war. Der deutsche Mediziner Gerhard Domagk (1895–1964) entwickelte sie in den 1930er Jahren zum antibiotischen Medikament weiter, das unter dem Handelsnamen Prontosil auf den Markt kam. In den Jahrzehnten darauf folgten weitere einschlägige Arzneistoffe, darunter Streptomycin, Tetracyclin und Erythromycin. Sie revolutionierten die Medizin und ermöglichten es, bakterielle Infektionen zu behandeln, die zuvor unheilbar gewesen waren – etwa die Tuberkulose. Dank der Antibiotika konnten Ärzte nun auch weitgehend gefahrlos operative Eingriffe vornehmen, die mit einem hohen Infektionsrisiko behaftet sind.

Allerdings dauerte es nicht lange, bis sich ein neues Problem abzeichnete: Krank machende Keime wurden gegen die Wirkstoffe zunehmend unempfindlich. Dass das passieren könnte, darauf hatte bereits Alexander Fleming hingewiesen. In seiner Rede zum Erhalt des Nobelpreises, den er 1945 für die Entdeckung des Penizillins bekam, warnte er nachdrücklich: »Es ist nicht schwer,



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH ANDERSSON, D., HUGHES, D.: MICROBIOLOGICAL EFFECTS OF SUBLETHAL LEVELS OF ANTIBIOTICS. NATURE REVIEWS MICROBIOLOGY 12, 2014, FIG. 1



RASCHE REAKTION Oberhalb des Zeitstrahls ist angegeben, wann ausgewählte Antibiotika erstmals klinisch eingesetzt wurden. Unterhalb ist zu sehen, wann erstmals resistente Bakterien, die den Menschen infizieren, nachweislich auftraten.

Mikroben im Labor resistent gegen Penizillin zu machen, indem man sie Konzentrationen aussetzt, die nicht ausreichen, um sie abzutöten, und dasselbe ist gelegentlich im Körper passiert.« Heute wissen wir, dass der Einsatz von Antibiotika in der Humanmedizin wie in der Tierhaltung massiv zur Evolution und Ausbreitung resistenter Pathogene beiträgt.

Bakterien sind Meister der Evolution. Dank ihrer kurzen Generationsdauer, ihrer in der Regel riesigen Populationen und ihres variablen Genoms passen sie sich üblicherweise sehr schnell an neue Umweltbedingungen an. Darum finden wir praktisch überall Mikroben – selbst an Orten, die durch extreme Temperaturen, Salzgehalte, pH-Werte oder eine hohe Strahlenbelastung gekennzeichnet sind. Sich an Antibiotika zu adaptieren, stellt für sie eine eher kleine Hürde dar.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie ein Mikroorganismus so evolvieren kann, dass er arzneimittelresistent wird. Durch genetische Mutationen kann sich der Angriffspunkt – beispielsweise ein Membranmolekül – verändern, auf den das jeweilige Antibiotikum zielt. Das macht den Wirkstoff häufig ineffektiv. Eine weitere Möglichkeit: Das Bakterium entwickelt ein Enzym, das den Arzneistoff direkt zerstört. Eine dritte Option ist die Ausbildung von Membrankanalproteinen, die jegliches Antibiotikummolekül, das in die Mikrobe eindringt, sofort wieder nach außen pumpen.

Resistenzmechanismen entstehen, weil wir Antibiotika massenhaft einsetzen – selbst in Situationen, in denen es aus medizinischer Sicht nicht notwendig ist. So gibt es immer noch Ärztinnen und Ärzte, die solche Medikamente bei Virusinfektionen (etwa gegen Erkältungen) verschreiben, obwohl sie gegen Viren nicht wirken. In eini-

gen Ländern kann man Antibiotika im Supermarkt kaufen und nach Belieben einnehmen. Mancherorts setzen Mediziner antibiotische Wirkstoffe in großem Stil vorbeugend ein, das heißt, ohne dass bakterielle Infektionen vorliegen – nur um im Nachhinein nicht wegen irgendwelcher Behandlungsfehler verklagt zu werden.

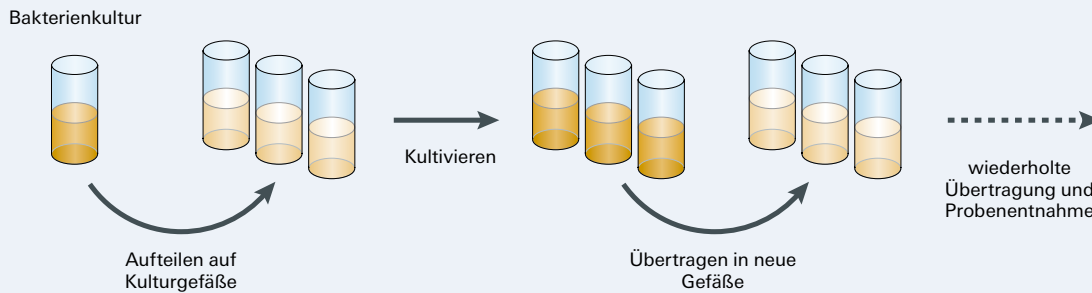
Weiterhin kommen Antibiotika in der Landwirtschaft zur Anwendung. Hier dienen sie zur Krankheitsprophylaxe in der Massenviehhaltung, die für die Tiere mit starkem Stress und erhöhtem Infektionsrisiko einhergeht. Darüber hinaus werden sie in einigen Ländern als Wachstumsförderer genutzt. Und das, obwohl jeglicher Antibiotikaeinsatz einen Selektionsdruck auf bakterielle Krankheitserreger ausübt, der die evolutionäre Entstehung von Resistenzmechanismen begünstigt. Wir bekommen es deshalb zunehmend mit multiplen Resistenzen zu tun, sprich mit Krankheitskeimen, die unempfindlich gegenüber mehreren Wirkstoffen sind. Im schlimmsten Fall erweisen sich die Pathogene als resistent gegen alle verfügbaren Medikamente; die von ihnen verursachten Erkrankungen lassen sich dann kaum noch behandeln.

Multiresistente Killer

Die enorme Ausbreitung der Antibiotikaresistenzen und die damit einhergehenden klinischen Probleme bezeichnen Fachleute als Antibiotikakrise. Sie hat bereits alarmierende Ausmaße angenommen. Zu Beginn des Jahres 2022 erschien in der Fachzeitschrift »The Lancet« eine systematische Übersichtsarbeit zur Bedrohung durch arzneimittelresistente Bakterien. Die Studie der »Antimicrobial Resistance Collaborators«, eines Zusammenschlusses dutzender Forscherinnen und Forscher, griff auf umfangreiche Datensätze zurück, die im Jahr 2019 weltweit erhoben worden waren und Angaben zu diversen Krankheitserregern und Arzneimitteln enthielten. Deren Analyse belegt, dass rund um den Globus etwa 5 Millionen Sterbefälle jährlich im Zusammenhang mit multiresistenten Keimen stehen. Für ungefähr 1,3 Millionen davon identifizierte das Team die resistenten Bakterien als direkte Todesursache, bei den restlichen Fällen

Evolutionsexperiment

Eine Bakterienpopulation wird auf Gefäße mit Nährmedium aufgeteilt und bestimmten Bedingungen ausgesetzt, etwa einem Antibiotikum. Die Bakterien werden unter diesen Bedingungen kultiviert und können sich anpassen, sofern möglich. In regelmäßigen zeitlichen Abständen überträgt man sie in neue Kulturgefäße mit frischem Nährmedium und gegebenenfalls anderen Bedingungen. Ihr Wachstumstempo liefert Hinweise auf evolutionäre Anpassungen; zudem lassen sie sich den Kulturgefäßen entnehmen und genauer untersuchen.



MACLEAN, B. ET AL.: THE POPULATION GENETICS OF ANTIBIOTIC RESISTANCE: INTEGRATING MOLECULAR MECHANISMS AND TREATMENT CONTEXTS. NATURE REVIEWS GENETICS 11, 2010, BOX 1: NUTZUNG GEMEINHEIT VON SPRINGER NATURE / CCG BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

besteht zumindest eine enge Verbindung zwischen Infektion und Tod.

Wenn wir nichts gegen die Antibiotikakrise unternehmen, laufen wir Gefahr, in eine Zeit wie vor 100 Jahren zurückzufallen, als bakterielle Erkrankungen nicht ursächlich behandelbar und somit potenziell tödlich waren – und selbst einfache operative Eingriffe lebensbedrohliche Folgen haben konnten. Die Weltgesundheitsorganisation sowie zahlreiche nationale Gesundheitsinstitutionen haben daher umfangreiche Maßnahmen ergriffen, um die Krise einzudämmen. Erstaunlicherweise finden evolutionäre Prozesse dabei so gut wie keine Berücksichtigung. In der erwähnten »Lancet«-Publikation beispielsweise tauchen die Begriffe »Evolution« oder »evolve« nicht auf. Und das stellt ein Problem dar.

Denn es ist ja gerade die Fähigkeit der Bakterien, sich evolutionär schnell weiterzuentwickeln und an neue Umgebungsbedingungen anzupassen, die Antibiotikaresistenzen so rasch verbreitet. Im Zuge ihrer Evolution haben es die Mikroben bisher noch immer geschafft, Resistenzen auszubilden – und zwar gegen sämtliche eingesetzten Arzneistoffe. Maßnahmen, um die Antibiotikakrise zu bewältigen, können deshalb nur dann nachhaltig wirken, wenn sie evolutionäre Prozesse berücksichtigen. Tun sie das nicht, laufen sie Gefahr, unbeachtete Selektionsdrücke auszuüben und damit neue Resistenzmechanismen zu triggern. So können falsch zusammengestellte Antibiotikakombinationen zur explosionsartigen Vermehrung unempfindlicher Bakterien führen und damit das Gegenteil dessen bewirken, was sie erreichen sollen.

Meine Kollegen und ich fanden im Jahr 2013 heraus: Behandelt man *E. coli*-Bakterien sowohl mit Erythromycin

als auch Doxycyclin, begünstigt man die Evolution doppelt resistenter Mikroben. Gelingt es damit nicht, die Bakterien schnell auszulöschen, beginnen sich die resistenten Varianten nach kurzer Zeit zu vermehren und stellen nach einigen Tagen eine größere Population, als wenn man nur ein Antibiotikum verabreicht.

Mit dem richtigen Behandlungsregime lässt sich das verhindern, wie wir 2018 aufzeigten. Dabei haben wir die Resistenzentwicklung in mehr als 1600 Experimenten mit rund 40 verschiedenen Antibiotikakombinationen beobachtet. Unsere systematische Untersuchung ergab, dass antimikrobielle Arzneistoffe, die sich gegenseitig in ihrem Effekt auf die Bakterien verstärken – Fachleute bezeichnen sie als synergistische Kombinationen –, zu einer deutlich höheren Aussterberate unter den krank machenden Mikroben führte. Die Anpassungsfähigkeit der Keime war zusätzlich eingeschränkt, wenn die verabreichten Antibiotika eine so genannte kollaterale Sensitivität (siehe weiter unten) bewirkten. Anschaulich ausgedrückt, werden die Bakterien dabei in einen evolutionären Konflikt hineinmanövriert, dem sie nicht entrinnen können, was zu ihrem Untergang führt. Der Schlüssel, um bakterielle Infektionen erfolgreich zu behandeln, lautet demnach, einen Therapieplan zu entwickeln, der evolutionäre Mechanismen berücksichtigt.

Was genau ist Evolution? Evolution tritt auf, wenn sich die genetische Zusammensetzung einer Population über die Zeit verändert. Es muss dabei eine Variation in vererbaren Merkmalen wie auch in der Fortpflanzung auftreten. Führen diese Veränderungen unter bestimmten Umweltbedingungen direkt zu einem höheren Fortpflanzungserfolg, dann verbessern sie die Anpassung an diese Bedingungen und sind adaptiv, wie es in der Fachsprache

heißt. Wirken sie sich nicht direkt auf die Vermehrung aus, sind sie neutral. Bei nachteiligen Konsequenzen gelten sie als maladaptiv. Mittlerweile kennen wir viele Faktoren, die evolutionäre Prozesse beeinflussen.

Von Generation zu Generation

Eine wichtige Methode, um solche Vorgänge zu untersuchen, sind so genannte Evolutionsexperimente. Sie finden in einer kontrollierten Laborumgebung und mit kurzlebigen Versuchsorganismen statt, an denen sich Adaptionsprozesse zeitnah verfolgen lassen. Indem man die Organismen unterschiedlichen Bedingungen aussetzt und beobachtet, wie sie darauf reagieren, kann man herausfinden, welche Faktoren die Evolution prägen.

Forscherinnen und Forscher haben in solchen Experimenten wiederholt untersucht, wie sich Antibiotikatherapien auf die Resistenzentwicklung bakterieller Krankheitserreger auswirken. Typischerweise teilen sie dabei eine Bakterienpopulation – etwa der Spezies *Pseudomonas aeruginosa* – in mehrere Gruppen auf, indem sie diese in separate Kulturgefäße geben. Jede dieser Gruppen wird einem anderen Behandlungsregime ausgesetzt. Je nachdem, wie gut die Mikroben damit zurechtkommen, vermehren sie sich besser oder schlechter. Die Wissenschaftler beobachten das mitunter tage- oder wochenlang, messen immer wieder das Zellwachstum, entnehmen in regelmäßigen Abständen Bakterien aus den Kulturen und untersuchen sie, darunter eben auch auf Resistenzen.

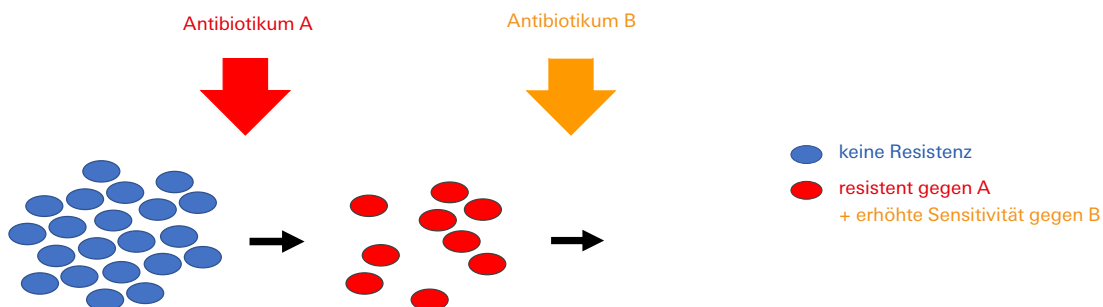
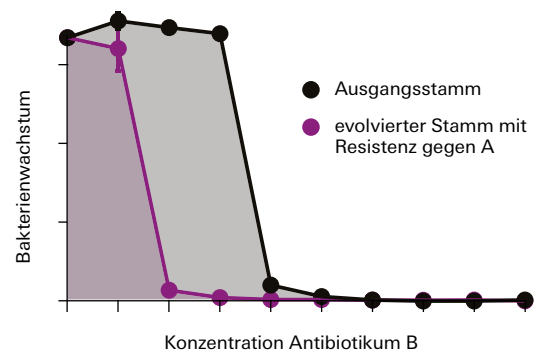
Derlei Versuche haben zahlreiche wichtige Ansätze geliefert, wie sich Arzneistoff-Unempfindlichkeiten vermeiden lassen. Zwei davon stechen heraus: Das schnelle Wechseln der verabreichten Antibiotika und die kollaterale Sensitivität.

Organismen passen sich evolutionär umso besser an eine bestimmte Umwelt an, je stabiler und beständiger diese ist. Denn dann treten nach und nach immer mehr adaptive Modifikationen auf und verbreiten sich in der Population. Ändern sich die Umgebungsbedingungen hingegen ständig, können günstige Veränderungen jederzeit zu ungünstigen werden und umgekehrt, was eine nachhaltige Adaption unmöglich macht. Eine »sequenzielle Antibiotikatherapie«, bei der die verabreichten Wirkstoffe in rascher Folge wechseln, sollte krankmachende Bakterien deshalb daran hindern, sich mittels Resistenzbildung anzupassen.

Mein Team und ich haben in mehreren Laborstudien demonstriert, dass dieser Ansatz funktioniert. Bei potenziellen Krankheitserregern wie *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* und *Staphylococcus aureus* lässt sich durch schnelle Antibiotikawechsel zumindest anfangs die Resistenzbildung verlangsamen; zudem führen solche Behandlungen häufiger zum Aussterben der Bakterienpopulation. Bisher ist das jedoch nur mit Hilfe von Laborexperimenten getestet worden und nicht im klinischen Umfeld. Entsprechende Untersuchungen werden hoffentlich bald folgen.

Als besonders vielversprechendes Prinzip einer nachhaltigen Antibiotikatherapie haben sich evolutionäre »Trade-offs« erwiesen. Trade-offs sind Zielkonflikte: Sie treten auf, wenn die evolutionäre Entstehung oder Verstärkung eines bestimmten Merkmals dazu führt, dass ein anderes verkümmert. Dazu kommt es beispielsweise, wenn jedes dieser Merkmale kostspielig ist und nicht genügend Ressourcen für beide zur Verfügung stehen. Oder wenn die Ausbildung von Eigenschaft A eine molekulare Veränderung voraussetzt, unter der Eigenschaft B

KOLLATERALE SENSITIVITÄT Rechts: Der Ausgangsstamm eines Erregers (schwarz) hat eine Variante (lila) hervorgebracht, die resistent gegen Antibiotikum A ist. Infolge der Resistenzbildung ist die Variante aber empfindlicher gegenüber Antibiotikum B geworden. Deshalb stirbt sie bei niedrigeren Konzentrationen von B ab als der Ausgangsstamm. Unten: Setzt man den Erreger zuerst A aus, so dass er eine Resistenz dagegen evolviert, und anschließend B, kann er sich nicht mehr anpassen.



leidet. Im Hinblick auf verbesserte Antibiotikatherapien ruhen große Hoffnungen auf einer speziellen Form evolutionärer Trade-offs, der kollateralen Sensitivität.

Von kollateraler Sensitivität sprechen wir, wenn verstärkte Resistenz gegenüber einem Antibiotikum zur Folge hat, empfindlicher gegen ein anderes zu werden. Das Phänomen haben Waclaw Szybalski und Vernon Bryson vom Biological Laboratory in Cold Spring Harbor, USA, schon im Jahr 1952 beschrieben. Es geriet aber wieder in Vergessenheit und wurde erst 2013 erneut entdeckt. Seitdem haben Forscherinnen und Forscher es bei diversen bakteriellen Krankheitserregern nachgewiesen; mein Team und ich belegten es im Jahr 2017 für die Spezies *Pseudomonas aeruginosa*.

Infografiken mitgestalten

Wie wirken Antibiotika? Wie entstehen Resistenzen? Das lässt sich grafisch darstellen. Wir bieten Ihnen die Möglichkeit, selbst aktiv an solchen Infografiken mitzuarbeiten und diese nach Ihren Wünschen anzupassen oder zu verändern. Deshalb finden Sie den vorliegenden Artikel auf unserer Website unter dem Link

www.spektrum.de/s/antibiotikakrise,

wo Sie weitere Informationen erhalten.

Kollaterale Sensitivität ist bei Mikroorganismen weit verbreitet, kann aber unterschiedliche Antibiotika beziehungsweise Kombinationen davon betreffen. Deshalb müssen Fachleute diesen Trade-off-Effekt für jede Ergerpopulation einzeln untersuchen und charakterisieren. Der Aufwand lohnt sich aber, weil man die Bakterien damit in eine evolutionäre Sackgasse manövrieren kann. Zuerst mit Wirkstoff A behandelt, evolvieren sie eine Resistenz dagegen und werden dadurch empfindlicher gegenüber Stoff B, den sie im Anschluss verabreicht bekommen. Meine Kollegen und ich haben für *Pseudomonas aeruginosa* gezeigt: Eine Resistenzentwicklung gegen das Fluorchinolon-Antibiotikum Ciprofloxacin zieht eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Aminoglykosid-Antibiotika nach sich. Die medikamentöse Behandlung von Ciprofloxacin auf Aminoglykoside umzustellen, kann die Bakterien deshalb nachhaltig dezimieren. Verallgemeinert ausgedrückt: Kollaterale Sensitivität verstärkt die Wirkung einer sequenziellen Antibiotikatherapie – vorausgesetzt, man behandelt mit den richtigen Medikamenten in der richtigen Reihenfolge. Der Wechsel des Arzneistoffs muss hierfür nicht notwendigerweise schnell erfolgen. Die Methode funktioniert auch, wenn man beide verwendeten Antibiotika zeitgleich verabreicht.

Laborexperimente verschiedener Forschungsgruppen haben bereits umfangreiche Daten dazu geliefert, wie sich die kollaterale Sensitivität bestmöglich einsetzen lässt, um Infektionen zu behandeln und gleichzeitig die Resistenzbildung zu minimieren. Eine spannende Frage lautet, ob und wie das auf die ärztliche Behandlung menschlicher Patienten übertragbar ist.

Festzuhalten bleibt: Ohne evolutionäre Prozesse zu berücksichtigen, werden wir die Antibiotikakrise nicht nachhaltig bewältigen. Die bisherigen Laborversuche haben viele Erkenntnisse dazu geliefert, wie sich solches Wissen für eine verbesserte Antibiotikabehandlung nutzen lässt. Besonders wichtig ist die Entdeckung, dass eine bessere Therapie mit bereits vorhandenen Antibiotika erreicht werden kann. Neue Wirkstoffe zu entwickeln, wie von der WHO und vielen nationalen Gesundheitsinstitutionen gefordert, scheint somit nicht immer zwangsläufig vonnöten. Eine gute Nachricht, denn neue Antibiotika auf den Markt zu bringen, ist teuer, Zeit raubend und oft leider von geringem Erfolg gekrönt, da die Mikroben binnen kurzer Zeit erneut Resistenzen dagegen ausprägen, wie die Erfahrung lehrt.

Neben den genannten Ansätzen einer evolutionsbasierten Medizin entwickeln Fachleute weitere Behandlungskonzepte, bei denen sie antimikrobielle Proteinfragmente, Bakterien zerstörende Viren oder Mikroben mit vorteilhaften Eigenschaften einsetzen. All diese Methoden können den Gebrauch von Antibiotika reduzieren und somit den Selektionsdruck auf Krankheitskeime mindern, Resistenzen auszubilden.

Und wie ist es mit Ann-Kathrins schmerzhaftem Ohrenleiden weitergegangen? Die Infektion ließ sich glücklicherweise heilen, indem die Patientin ein Kombinationspräparat aus den antibiotischen Arzneistoffen Polymyxin B, Neomycin und Gramacidin erhielt. Das drängte den Keim schließlich zurück. Möglicherweise erlag er dabei der kollateralen Sensitivität: Ann-Kathrin war zuvor ja mit Ciprofloxacin behandelt worden, und eine Resistenz dagegen geht bei *Pseudomonas aeruginosa* meist mit einer erhöhten kollateralen Sensitivität gegenüber Aminoglykosid-Antibiotika einher, zu denen das im Präparat enthaltene Neomycin gehört. ◀

QUELLEN

Antimicrobial Resistance Collaborators: Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *The Lancet* 399, 2022

Barbosa, C. et al.: Antibiotic combination efficacy (ACE) networks for a *Pseudomonas aeruginosa* model. *PLOS Biology* 16, 2018

Batra, A. et al.: High potency of sequential therapy with only β -lactam antibiotics. *eLife* 10, 2021

Hernando-Amado, S. et al.: Mutational background influences *P. aeruginosa* ciprofloxacin resistance evolution but preserves collateral sensitivity robustness. *PNAS* 119, 2022

Pena-Miller, R. et al.: When the most potent combination of antibiotics selects for the greatest bacterial load: the smile-frown transition. *PLOS Biology* 11, 2013

Wo endet das Sonnensystem?

Dort, wo der Einfluss der Sonne aufhört. Aber es ist gar nicht so einfach, einen genauen Ort festzulegen. Vor allem kommt es darauf an, wie man den Einflussbereich definiert.

» spektrum.de/artikel/2150685

Am 20. August und 5. September 1977 sind zwei Raumsonden ins All gestartet: zuerst Voyager 2 und danach Voyager 1. Damit sind sie schon fast so lange im Weltraum unterwegs, wie ich auf der Welt bin. Im Gegensatz zu den Sonden habe ich in den 46 Jahren meines Lebens das Sonnensystem aber nie verlassen. Voyager 1 dagegen ist laut Medienberichten im Mai 2005 aus dem Sonnensystem hinausgeflogen. Und im September 2009 noch einmal. Genauso wie im Mai 2010, im Dezember 2011 und im September 2013. Grund für diese scheinbar widersprüchlichen Aussagen ist, dass sich das »Ende« des Sonnensystems nur schwer definieren lässt. Es gibt aber eine Formel, die dabei hilft:

$$mv^2 \frac{d}{r^2} = nkT$$

Der Ausdruck links beschreibt den Druck des Sonnenwinds. Er hängt von der Masse m der Teilchen ab, aus denen der stellare Wind besteht, von ihrer Geschwindigkeit v , der Dichte d und dem Abstand zur Sonne r . Auf der rechten Seite steht der thermische Druck des interstellaren Mediums (gegeben durch seine Dichte n , seine Temperatur T und die Boltzmann-Konstante k). Das interstellare Medium (ISM) ist die Materie, die den Raum zwischen den Sternen einer Galaxie durchzieht, und besteht aus verschiedenen Gasatomen und Staubteilchen.

Das Sonnensystem bewegt sich durch diese Materie hindurch, mit einer Geschwindigkeit von zirka 25 Kilometern pro Sekunde. Das ISM ähnelt also einer Art Fahrtwind; gleichzeitig strömt der Sonnenwind unseres Sterns nach außen. Letzterer übt einen Druck auf das ISM aus und umgekehrt. Die Formel beschreibt den Punkt, an dem sich die beiden Drücke gerade gegenseitig ausbalancieren. Oder vereinfacht gesagt: die Position, an der der Sonnenwind nicht mehr vom ISM unterscheidbar ist. Dort endet der Einfluss der Sonne.

Wo genau das ist, hängt von der aktuellen Stärke des Sonnenwinds und der interstellaren Umgebung ab; die Grenze variiert also zeitlich und räumlich (und kann zwischen 120 und 200 Astronomischen Einheiten liegen). Das ist einer der Gründe für die verwirrenden Angaben in den Medien, wann die Sonden das Sonnensystem verlassen haben. Doch abgesehen davon kann man auch argumentieren, dass Voyager 1 und 2 noch sehr lange Teil des Sonnensystems sein werden.

Denn neben dem Einfluss des Sonnenwinds gibt es die Gravitationskraft, die unser Stern ausübt. Außer den acht Planeten, die sich alle weit innerhalb des Einflussbereichs des stellaren Winds (der Heliosphäre) befinden, werden noch mehr Himmelskörper von der Schwerkraft der Sonne angezogen. Der 2003 entdeckte Asteroid Sedna befindet sich beispielsweise auf einer Umlaufbahn, deren fernster Punkt 944 Astronomische Einheiten von der Sonne entfernt ist. Der 2015 gefundene Asteroid Leleākūhonua hat eine Distanz von weit über 1000 Astronomische Einheiten und andere Asteroiden bewegen sich noch viel weiter darüber hinaus. Genau genommen ist die Reichweite der Gravitationskraft unendlich, aber irgendwann überwiegen die Anziehungskräfte der Nachbarsterne. Der gravitative Einfluss der Sonne reicht etwa 100 000 Astronomische Einheiten (knapp 1,5 Lichtjahre).

Die Sonden sind bis jetzt zirka 160 (Voyager 1) und 133 (Voyager 2) Astronomische Einheiten weit gekommen. Sie befinden sich nicht mehr im Einflussbereich des Sonnenwinds und können die Bedingungen im interstellaren Medium erforschen. Bis man absolut sicher sagen kann, dass sie unser Sonnensystem verlassen haben, werden noch zehntausende Jahre vergehen. Bis dahin werden ihre Instrumente und Kommunikationsgeräte längst nicht mehr funktionieren. Dann werden die Voyager-Sonden durch die Milchstraße treiben, ohne dass wir ihr Schicksal weiter verfolgen können.



Florian Freistetter

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

ZEMENTHERSTELLUNG

Neuerfindung eines alten Baumaterials

Seit über 2000 Jahren bauen die Menschen mit Zement und Beton. Aber wie lassen sich die riesigen Mengen an Kohlenstoffdioxid vermeiden, die bei seiner Herstellung anfallen?

» [spektrum.de/artikel/2150676](https://www.spektrum.de/artikel/2150676)



M. Mitchell Waldrop ist Journalist in Washington, D.C.

SERIE KLIMANEUTRALE INDUSTRIE

TEIL 1: JULI 2023

Mit Wasserstoff zu sauberem Stahl

Davide Castelvechi

▶ TEIL 2: AUGUST 2023

Neuerfindung eines alten Baumaterials

M. Mitchell Waldrop

TEIL 3: SEPTEMBER 2023

Der Umbau der Chemieindustrie

Verena Tang

BETON ist das am häufigsten eingesetzte Baumaterial der Welt. Er ist günstig und praktisch – nur leider nicht umweltfreundlich.

Wer es als Erstes getan hat oder wann, ist unbekannt. Doch bereits im zweiten oder dritten Jahrhundert vor Christus zermahlten römische Ingenieure routinemäßig gebrannten Kalkstein und Vulkanasche und stellten daraus eine Substanz namens »caementum« her: ein Pulver, das zu härten begann, sobald man es mit Wasser vermischte.

Den noch feuchten Schlamm nutzten sie großzügig als Mörtel für ihre Ziegel- und Steinwerke. Noch ausgeklügelter wurde die Mischung, wenn sie Bimsstein, Kieselsteine oder Tonscherben in das Wasser einrührten: Im richtigen Verhältnis bindet der Zement schließlich alles zu einem starken, beständigen, steinähnlichen Konglomerat – dem »opus caementicium«, später auch »concretum« genannt.

Die Römer verbauten dieses Wundermaterial in ihrem gesamten Reich – in Viadukten, Wellenbrechern, Amphitheatern wie dem Kolosseum und sogar Tempeln. Das Pantheon in Rom besitzt bis heute die größte unbewehrte Betonkuppel der Welt.

Zwei Jahrtausende später tun wir mehr oder weniger immer noch das Gleiche: Gigatonne für Gigatonne gießen wir Beton, um Straßen, Brücken, Hochhäuser und andere sichtbare Pfeiler der modernen Gesellschaft zu bauen. Weltweit produziert die Menschheit heute jedes Jahr schätzungsweise 30 Milliarden Tonnen Beton. Und durch den Bauboom in sich rasch entwickelnden Ländern wie China und Indien wird diese Zahl noch weiter steigen.

Leider hat unsere lange Liebesbeziehung zu Beton auch zu unserem Klimaproblem beigetragen. Am häufigsten verwendet man zum Binden des heutigen Betons eine Innovation aus dem 19. Jahrhundert, bekannt als Portlandzement. Er wird unter hohem Energieaufwand in Öfen gebrannt. Mit jeder Tonne Produkt entsteht dabei mehr als eine halbe Tonne Kohlenstoffdioxid. Multipliziert mit dem enormen weltweiten Bedarf ergibt sich, dass die

Zementherstellung zirka acht Prozent des gesamten weltweiten CO₂-Ausstoßes verursacht.

Das ist zwar lange nicht so viel wie die jeweils 20 Prozent, die der Verkehr oder die Energieerzeugung beitragen. Doch das Problem ist zu groß, um es zu ignorieren. »Es ist inzwischen anerkannt, dass wir die weltweiten Nettoemissionen bis 2050 auf null reduzieren müssen«, sagt Robbie Andrew, leitender Forscher am CICERO, dem Centre for International Climate Research in Oslo, Norwegen. »Und die Betonindustrie will nicht der Bösewicht sein, also sucht sie nach Lösungen.«

Große Branchenverbände wie die Global Cement and Concrete Association in London und die Portland Cement Association mit Sitz im US-Bundesstaat Illinois haben jetzt detaillierte Pläne veröffentlicht, um besagte acht Prozent bis 2050 auf null zu senken. Viele ihrer Strategien stützen sich auf neue Technologien; weitere versuchen, alternative Materialien zu nutzen und jahrzehntealte Praktiken zu verbessern. Alle Ansätze lassen sich anhand der drei chemischen Reaktionen verstehen, die den Lebenszyklus von Beton charakterisieren: Kalzination, Hydratation und Karbonatisierung (siehe Grafiken).

Der direkte Ansatz: Emissionen von Anfang an vermeiden

Portlandzement wird in riesigen Drehrohröfen hergestellt, in denen die Kalzinierungsreaktion abläuft (siehe »Zementherstellung«):

Kalziumkarbonat (Kalkstein, Kalk) + Wärme →
Kalziumoxid (Branntkalk) + Kohlenstoffdioxid

Das karbonatreiche Gestein wird zerkleinert und zusammen mit Ton in den Ofen gegeben. Ton und Branntkalk verbinden sich; Minerale aus dem Ton machen den Beton letzten Endes riss- und witterungsbeständig. Das Produkt der Reaktion im Drehrohrföfen ist Zementklinker oder kurz Klinker: helle, gräuliche Knollen, die zu Zementpulver gemahlen werden.

Etwa 40 Prozent der CO₂-Emissionen eines Drehrohröfens stammen von der Wärmeerzeugung bei dem Prozess. Dieser Anteil ist schwer zu reduzieren. Denn die Klinkerproduktion erfordert Spitztemperaturen von 1450 Grad Celsius – das ist heißer als flüssige Lava – und die Ofenbetreiber gingen lange Zeit davon aus, dass sich eine solche Hitze in der Praxis nur durch das Verbrennen von Kohle oder Erdgas erzeugen lässt, denn Biomasse wie Holz brennt nicht gleichmäßig heiß genug. Und herkömmliche elektrische Heizungen, die mit Strom aus Wind- oder Solaranlagen betrieben werden, beziehen ihre Wärme aus dem elektrischen Widerstand der stromführenden Drähte. »Man kann nicht viel herausholen, bevor das Kabel auseinanderfällt«, sagt Andrew dazu.

Dennoch hat die Industrie inzwischen begonnen, vollelektrische Optionen zu erforschen, die sich mit Energie aus erneuerbaren Quellen betreiben lassen. So hat etwa das schwedische Unternehmen SaltX Technology im Mai 2022 gezeigt, dass es Klinker mit seinem

AUF EINEN BLICK

Beton auf dem Prüfstand

- 1 Mit jeder Tonne Zement entstehen gut 600 Kilogramm Kohlenstoffdioxid. Damit gehen rund acht Prozent des weltweiten CO₂-Ausstoßes auf das Konto der Zementindustrie.
- 2 Ein Teil davon ließe sich durch energie sparende Produktionsmethoden vermeiden. Doch 60 Prozent des CO₂ stammen aus der chemischen Reaktion bei der Zementbildung.
- 3 Manche Fachleute tüfteln daher an einer Neuentdeckung des Betons, teils ganz ohne Zement. Ziel: das Klima schützen und gleichzeitig ein besseres Material erschaffen.

»Electric Arc Calciner« herstellen kann. Das System ähnelt den Plasmabrennern, mit denen unter anderem Automobilhersteller Metall schneiden. Man leitet dabei einen elektrischen Strom durch einen Strahl aus Inertgas, in der Regel Stickstoff oder Argon. Auf diese Weise wird das Gas ionisiert und auf mehr als 20000 Grad Celsius erhitzt. Im Juni 2022 kündigte SaltX eine Partnerschaft mit dem schwedischen Kalksteinlieferanten SMA Mineral an, um die Technologie schneller auf den Markt zu bringen.

Und bereits 2021 demonstrierte das deutsche Unternehmen Heidelberg Materials (bis 2022 Heidelberg-Cement), dass es die fossilen Brennstoffe für die Klinkerherstellung durch Wasserstoff ersetzen kann, der bei über 2000 Grad Celsius brennt. Derzeit wird Wasserstoff hauptsächlich aus Erdgas gewonnen. Er lässt sich aber auch durch Elektrolyse von Wasser produzieren. Für die Zukunft eine realistische Option, meint Andrew: In dem Maße, wie die Preise für saubere Energie sinken und die Erzeugung großer Mengen Wasserstoff mit Ökostrom greifbarer wird, wachse das Interesse der Zementunternehmen an der Technologie.

Aber selbst dann bleibe noch einiges zu tun, bevor Zementhersteller weltweit in großem Stil auf Wasserstoff umsteigen könnten, sagt Richard Bohan, der bei der Portland Cement Association für Nachhaltigkeit zuständig ist. Denn die Systeme seien noch nicht darauf ausgerichtet. »Wasserstoff wäre großartig – und könnte unseren CO₂-Fußabdruck auf Anhieb um 40 Prozent reduzieren«,

sagt er. »Wasserstoff braucht jedoch eine Infrastruktur: entweder Pipelines oder ein sehr robustes Stromnetz«.

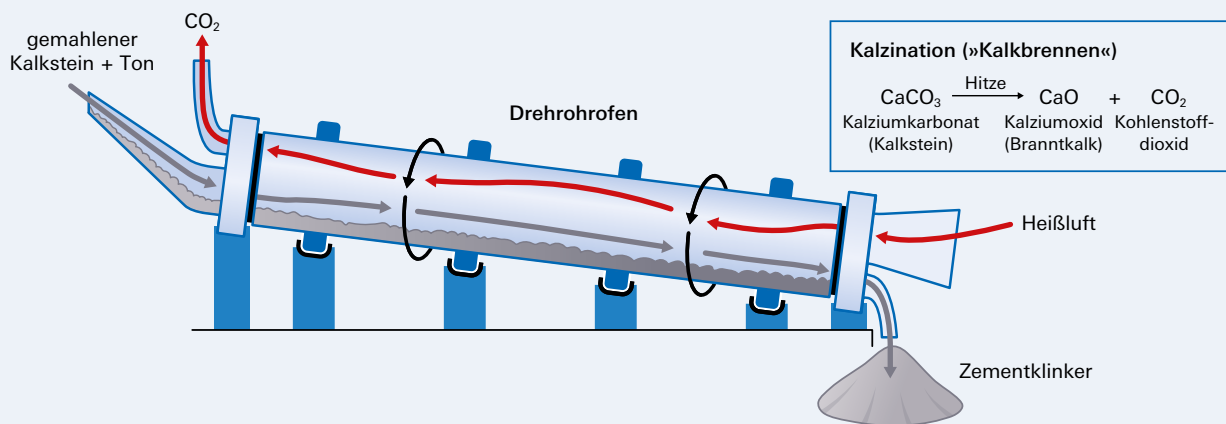
Die anderen 60 Prozent der CO₂-Emissionen stammen aus der chemischen Reaktion, die beim Kalkbrennen abläuft. Um sie in den Griff zu bekommen, beginnt die Industrie derzeit, altbekannte Alternativen für Zementrohstoffe wiederzuentdecken.

Durch die Zugabe von pulverisiertem, ungebranntem Kalkstein zum Endprodukt lässt sich der CO₂-Ausstoß eines Ofens beispielsweise um bis zu zehn Prozent senken. Kalkstein allein ist zwar relativ reaktionsträge, doch er hilft beim Aushärten des Portlandzements, wenn dieser mit Wasser gemischt wird. In Europa verwendet man den so zusammengesetzten Portlandkalksteinzement bereits häufig, in den USA ist er langsam auf dem Vormarsch.

Brennofenbetreiber erwägen außerdem, einen Teil ihres kalksteinbasierten Zements durch mineralstoffreiche industrielle Abfallprodukte zu ersetzen. Etwa durch Hochofenschlacke aus Stahlwerken: Sie ist reich an Kalzium und härtet wie herkömmlicher Zement aus, wenn man sie mit Wasser mischt. Auch Flugasche aus Kohlekraftwerken kommt zum Einsatz. Sie härtet jedoch nicht von selbst aus, sondern erst, wenn sie mit Wasser und Standardzement vermischt wird. In beiden Fällen ergibt sich ein Beton, der mindestens so fest und beständig ist wie der herkömmliche. Er ist etwas rauer und wird langsamer hart – und kann die CO₂-Emissionen um weitere 15 oder sogar 20 Prozent senken.

Zementherstellung

Der gängigste Zement ist heute Portlandzement. Um ihn zu erhalten, gibt man Kalkstein und Ton in einen Drehrohrofen, wo das Gemisch durch einen Heißluftstrom auf zirka 1400 Grad Celsius erhitzt wird. Bei diesen Temperaturen gibt Kalkstein (Kalziumkarbonat, CaCO₃) CO₂ ab und wird zu Kalziumoxid (CaO, man spricht auch von Branntkalk oder gebranntem Kalk). Dieses verbindet sich mit den Tonmineralen. Nach dem Abkühlen erhält man Zementklinker, der anschließend zu Zementstaub vermahlen und weiterverarbeitet wird. Die Kalzination ist die größte Quelle für Kohlenstoffdioxid bei der Zementherstellung: zum einen direkt durch den chemischen Prozess, zum anderen indirekt durch den hohen Energieaufwand.



Natürlich entstand beim ursprünglichen Erzeugen dieser Abfälle viel Kohlenstoffdioxid. Doch wenn man sie dem Zement zusetzt, produziert man zumindest kein neues. Im Übrigen gibt es beträchtliche Rückstände an Schlacke und Aschen aus den vergangenen mehr als 200 Jahren – es ist also genügend vorhanden, selbst dann, wenn eines Tages weltweit keine Kohle mehr verbrannt werden sollte. »Es ist eine Win-win-Situation. Wenn man den Abfall hat, ist es billiger, den Klinker dadurch zu ersetzen, als neuen Klinker zu produzieren«, urteilt Andrew. In der Tat nutzen rasch wachsende Volkswirtschaften wie Brasilien und China, die beim Aufbau ihrer Industrien Berge von Schlacke und Asche produzieren, die Technik schon oft.

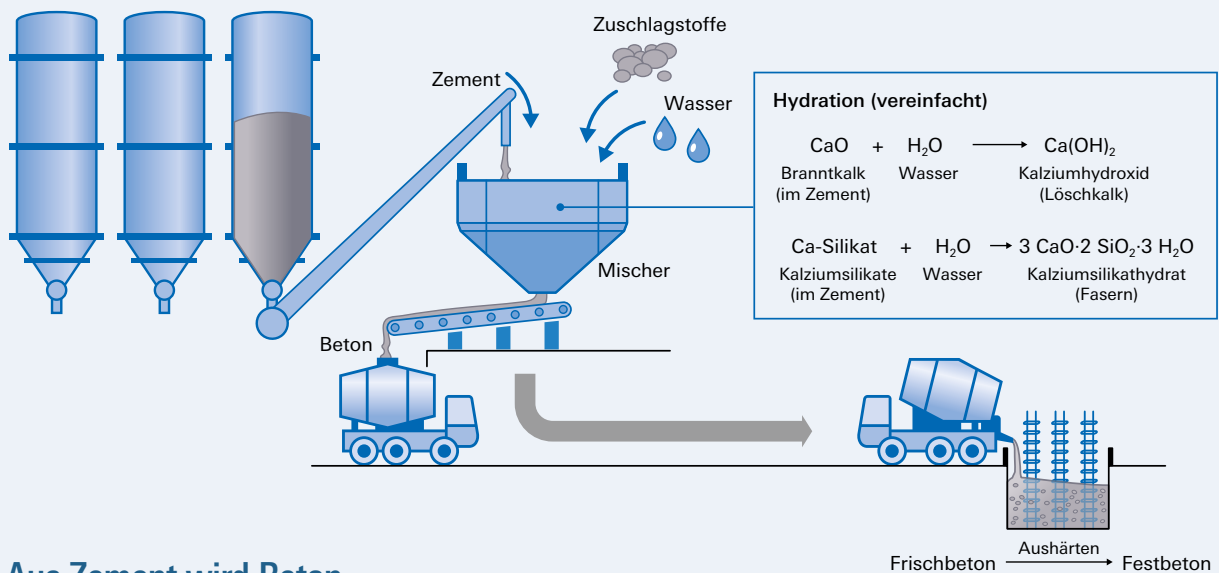
Die erwähnten Ersetzungen allein können jedoch nur rund ein Fünftel von jenem CO₂ einsparen, das bei der chemischen Reaktion frei wird. Daher haben Fachleute aus der Industrie mindestens ein halbes Dutzend Rezepte für alternative Zemente untersucht, mit denen sich der Ausstoß weiter minimieren oder ganz beseitigen ließe: indem man vollständig auf Kalziumkarbonat verzichtet.

Das sei definitiv eine langfristige Lösung, gibt der Umweltwissenschaftler Jeffrey Rissman zu bedenken. Er untersucht industrielle Treibhausgasemissionen bei Energy Innovation, einer Denkfabrik für Klimapolitik in San Francisco. »Solche neueren Technologien befinden sich in verschiedenen Stadien der Forschung und Ent-

wicklung und der Kommerzialisierung«, erläutert er. »Sie müssen also noch technologisch verfeinert und günstiger werden, bis man sie in größerem Maßstab einsetzen kann.«

Zu den am weitesten entwickelten Alternativen gehören Geopolymere. Die harten Materialien entstehen, wenn man verschiedene Silizium- und Aluminiumoxide in eine alkalische Lösung wie etwa Natronlauge einlegt: Dann verbinden sie sich zu langen Ketten und Netzwerken. Weil man alkalische Lösungen braucht und kein reines Wasser, sind Geopolymerzemente auf Baustellen zwar schwieriger zu handhaben. Dennoch hat man sie bereits bei einer Reihe von Bauprojekten erfolgreich eingesetzt. Und die Industrie zeigte sich in den letzten zehn Jahren zunehmend interessiert: Geopolymere haben nicht nur einen um 80 Prozent kleineren CO₂-Fußabdruck gegenüber herkömmlichem Portlandzement, sondern sind auch um einiges stabiler und beständiger gegenüber Wasser, Feuer, Witterung und Chemikalien. Deshalb werden sie seit den 1970er Jahren kommerziell hergestellt. Sie schließen giftige Abfälle ein, dichten gewöhnlichen Beton gegen Witterungseinflüsse ab und ermöglichen zahlreiche weitere Anwendungen.

An den Rohstoffen dafür mangelt es nicht: Silizium- und Aluminiumoxide sind in Schlacke und Flugasche reichlich vorhanden, außerdem findet man sie in Ton, Altglas und sogar in landwirtschaftlichen Nebenerzeug-



Aus Zement wird Beton

Zementstaub wird mit Wasser und Zuschlagstoffen wie Sand oder Kies vermischt und zu Beton verrührt. Von da an findet die Hydratation statt: Kalziumoxid bildet mit Wasser Kalziumhydroxid (Ca(OH)₂); verschiedene Minerale, die sich bei der Reaktion im Drehrohfen aus Kalkstein und Ton gebildet haben, erzeugen Fasern aus Kalziumsilikathydraten. Auf der Baustelle gießt man den flüssigen Beton in eine formgebende Schalung, wo er anschließend aushärtet. Stahlbewehrungen werden dabei in die Mischung eingeschlossen.

nissen. Zement aus Geopolymeren könnte also nicht nur den CO₂-Ausstoß senken, sondern auch gleich helfen, lästige Abfallprodukte loszuwerden.

Der indirekte Ansatz: effizienterer Beton

Im Zementmischwerk wird der Zement seiner Bestimmung zugeführt – er wird mit Wasser zu Beton verarbeitet. Hier beginnt die Hydratationsreaktion abzulaufen (siehe »Aus Zement wird Beton«):

Zement (CaO und Mineralien) + Wasser (H₂O) + Zuschlagstoff (Sand oder Kies) + Luft → Beton

Die Betonaufschlammung, bestehend aus Zement, Wasser und Zuschlagstoffen, wird auf der Baustelle in eine formgebende Schalung gegossen. Dann lässt man die Mischung für Tage oder Wochen ruhen. Wasser und Zement reagieren miteinander und härten aus. Hierbei werden auch die Zuschlagstoffe, die für die Festigkeit und das Volumen des Materials sorgen, sowie die Bewehrung (beispielsweise Stahl) eingeschlossen.

Abgesehen vom Transport der Materialien zur Baustelle entsteht hier kein weiteres Kohlenstoffdioxid. Indirekt lässt sich der Zementverbrauch eines Gebäudes aber auch dadurch verringern, indem man den Beton ganz einfach so sparsam wie möglich verwendet.

Eine sorgfältige Beachtung der Betoneffizienz könnte fast ein Viertel der CO₂-Reduktionen bringen, die es braucht, um das Null-Emissions-Ziel der Industrie für 2050 zu erreichen, schätzt die Global Cement and Concrete Association. Aber das sei noch nicht die Norm, gibt Cécile Faraud zu bedenken, die bei der internationalen Klimaschutzgruppe C40 Cities für sauberes Bauen zuständig ist. Normalerweise verwende man eher etwas mehr Beton, um sicherzugehen, dass das Gebäude auch halte.

Das hat einen guten Grund, wie Bohan von Portland Cement erläutert: »Bauunternehmer, Materiallieferanten, Architekten und Ingenieure sind von Natur aus sehr risikoscheu«, sagt er – ebenso wie die Behörden, die Bauvorschriften erlassen. »Sie wollen, dass die bauliche Umwelt sehr lange hält«, also Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Und wie sich 2021 in Surfside im US-Bundesstaat Florida zeigte, können die Folgen baulichen Versagens sehr hoch sein: Dort stürzte ein 40 Jahre altes Wohnhochhaus ein, 98 Menschen kamen ums Leben.

Dennoch, so Bohan weiter, habe angesichts des Klimawandels ein Umdenken eingesetzt. »Die Branche hat erkannt, dass sie Sicherheit, Widerstandsfähigkeit und gleichzeitig eine nachhaltige bauliche Umwelt bieten kann«, sagt er. Außerdem müssen die Betonhersteller mit immer mehr klimabewussten Stadtverwaltungen zusammenarbeiten, die den Wandel gesetzlich verankern: Die kanadische Stadt Vancouver etwa hat sich 2016 zum Ziel gesetzt, die CO₂-Emissionen durch Beton und andere Baumaterialien bis 2030 um 40 Prozent zu senken.

Bauherren und Ingenieure erproben viele Möglichkeiten, Beton einzusparen, ohne die Sicherheit zu beeinträchtigen. Eine davon ist eine sorgfältige Planung. So enthiel-

ten Betonmischungen mit höherer Festigkeit oft mehr Zement, sagt Rissman. »Man kann diese Mischungen für tragende Elemente wie Stützpfeiler vorhalten und eine weniger starke Mischung für Gehwege oder Treppen verwenden, die kein großes Gewicht tragen müssen«, schlägt er vor.

Eine Hightechmethode mit ganz ähnlichem Ergebnis hat ein Forschungsteam der Technischen Universität Graz in Österreich im Mai 2022 demonstriert. Sie fanden heraus, dass sie den CO₂-Fußabdruck eines Betongebäudes durch den Einsatz riesiger 3-D-Drucker halbieren können. Solche Systeme sind in den letzten Jahren weltweit auf Interesse gestoßen, weil sich so Häuser und andere Bauwerke aus lokal verfügbaren Materialien rasch und erschwinglich bauen lassen.

Robotergesteuerte Düsen stoßen dabei Ströme von nassem Beton aus und bauen Schicht für Schicht Wände und andere Elemente auf. Das Grazer Team sparte Material, indem es mit dieser Methode komplizierte, mit Hohlräumen gefüllte Wände und Decken herstellte. Den Beton platzierten die Düsen exakt dort, wo er für maximale Festigkeit und Sicherheit benötigt wurde, aber nirgends sonst. Wie das Team ebenso zeigte, können die Drucker dünne Stahldrähte zusammen mit der nassen Aufschlammung extrudieren. Damit verstärkt man die Teile der Struktur, bei denen der Beton allein nicht genügt, und umgeht herkömmliche Bewehrungsstangen. Einen ähnlichen Weg gingen Forscher der ETH Zürich in der Schweiz: Sie erstellten mittels 3-D-Drucker eine hauchdünne, flexible Schalung für ihre Betonelemente und konnten dadurch quasi beliebig geformte Strukturen herstellen, was letztlich ebenfalls Beton einsparte (siehe »3-D-Häuser nach dem Eierschalenprinzip«, Spektrum 3/2023).

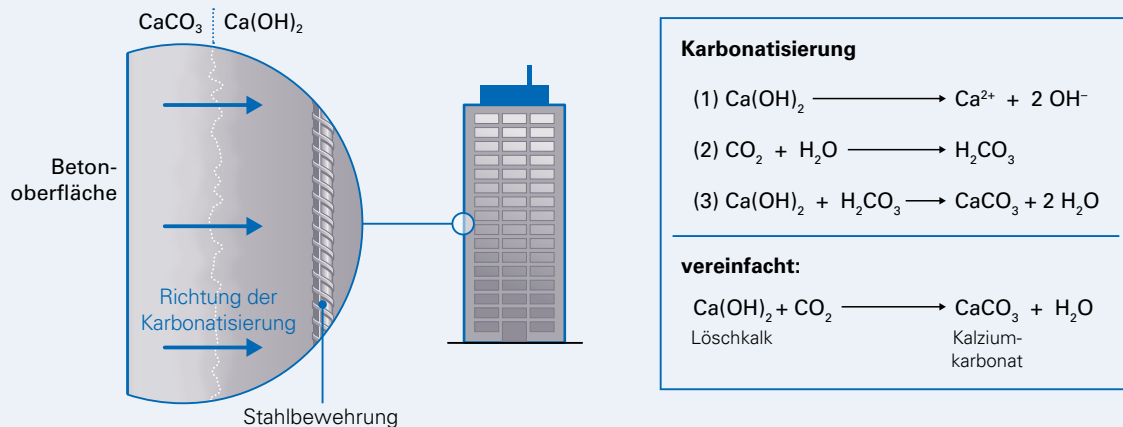
In einem noch fortschrittlicheren Ansatz mischten Fachleute Beton mit speziellem Wasser an, in dem Flocken aus Graphen schwammen. Dieses extrem starke Material besteht aus einer einzelnen Schicht von Kohlenstoffatomen, die wie Bienenwaben ein hexagonales Gitter bilden. Das Forscherteam der University of Exeter in England verkündete 2018, dass der mit einer solchen Graphen-Suspension hergestellte Beton um knapp 150 Prozent stärker ist als herkömmlicher. Wenn es gelingt, Graphen massenhaft zu einem so niedrigen Preis herzustellen, dass es routinemäßig verwendet wird, dann würde ein Gebäude aus solchem Beton mit der gleichen strukturellen Stärke nur etwa halb so viel Zement benötigen wie ein konventionell gebautes, ergaben die Berechnungen der Fachleute. Damit könnte die Technik den CO₂-Ausstoß nennenswert beeinflussen.

Neben diesen ausgeklügelten Ideen kommt ein anderer Ansatz ganz ohne Technologien aus: bereits gebaute Strukturen so lange wie möglich weiter zu nutzen. »Je länger die Gebäude halten, desto weniger Beton braucht man für neue«, sagt Diana Ürge-Vorsatz, Umweltwissenschaftlerin an der Central European University in Wien und Mitverfasserin einer Studie über Wege zu einer Netto-Null-Bauindustrie im Annual Review of Environment and Resources 2020.

Beton altert

Sobald das fertige Betonbauteil mit Luft und Wasser in Kontakt kommt, läuft die Umkehrreaktion der Zementbildung ab: die Karbonatisierung. Im Endeffekt verbindet sich Kalziumoxid im Beton dabei mit Kohlenstoffdioxid aus der Luft wieder zu Kalziumkarbonat. So nehmen Gebäude über lange Zeit einen Teil des CO_2 wieder auf, das bei ihrer Herstellung entstanden ist.

Im Detail greifen dabei verschiedene Reaktionen ineinander. Durch das vorhandene Kalziumhydroxid herrschen im Beton alkalische Bedingungen (pH 12 oder höher). In dieser Umgebung verbinden sich CO_2 und Wasser zu Kohlensäure (H_2CO_3), die wiederum mit Kalziumhydroxid zu Kalziumoxid und Wasser reagiert. Der Prozess bindet also nicht nur CO_2 , sondern gleichzeitig werden Hydroxidionen neutralisiert, wodurch der pH-Wert sinkt. Aus diesem Grund rosten Stahlbewehrungen, wenn die Karbonatisierung weit fortschreitet: Die alkalische Betonumgebung schützt sie vor Korrosion, doch je saurer die Umgebung wird, desto eher können Wasser und Sauerstoff die Metallverstärkungen angreifen.



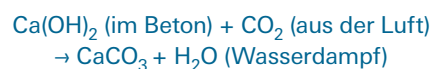
Ürge-Vorsatz ist gleichzeitig stellvertretende Vorsitzende der Arbeitsgruppe für Emissionsminderung des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, Weltklimarat). In Industrieländern müssten Steuerpolitik und andere Anreize die Wiederverwendung von Gebäuden belohnen, fordert sie. Währenddessen müsse sich der Fokus in rasch wachsenden Wirtschaften wie China und Indien von Geschwindigkeit hin zu Qualität verlagern. »Wenn man nur schnell expandieren will, dann tut man das möglichst billig«, sagt sie und illustriert, wozu das führt: »In Osteuropa hatten wir in den 1960er und 1970er Jahren einen großen Bauboom, und viele der damals errichteten Gebäude bröckeln bereits.«

Und dann gibt es noch den »betonfreien« Ansatz: Man ersetzt das graue Material vollständig durch etwas anderes. Eine aufkommende Option ist Massivholz. Unter diesem Begriff fasst man eine Vielzahl von Holzprodukten zusammen, die verleimt oder anderweitig zu riesigen Strukturelementen verbunden werden. Sie sind so tragfähig wie Beton und Stahl oder übertreffen die Materialien sogar. Seit seiner Entwicklung durch österreichische Forscher in den frühen 1990er Jahren hat sich Massivholz in Europa weit verbreitet und wird auch in den USA zunehmend beachtet. Das weltweit höchste Gebäude in

Holzrahmenbauweise, ein 87 Meter hoher Turm mit Wohnungen und Geschäften, wurde im Juli 2022 in Milwaukee im US-Bundesstaat Wisconsin fertiggestellt. Er wird seinen Rekord aber möglicherweise nicht mehr lange halten: Es gibt bereits Vorschläge für höhere Gebäude in Massivholzbauweise, darunter eines, das sich 80 Stockwerke hoch über das Hafenviertel von Chicago erheben soll.

Der zukunftsweisende Ansatz: die Karbonatisierung ausnutzen

Auch wenn es so scheint, ist Beton chemisch nicht inert. Sobald er auszuhärten beginnt, läuft bereits die Karbonatisierung ab:



Der Prozess ist die spontane Umkehrung der Zementbildung, erklärt Andrew: Sobald die Kalziumverbindungen im Beton dem CO_2 in der Luft ausgesetzt sind, bilden sie wieder Kalziumkarbonat (siehe »Beton altert«).

Das geschehe auf einer frischen Betonoberfläche rasch, fügt Andrew hinzu, und verlangsamt sich anschlie-

Vor zehn Jahren schien es keine praktikablen klimafreundlichen Alternativen zu Portlandzement zu geben

ßend, da die Kohlenstoffdioxidmoleküle immer tiefer in die feste Masse diffundieren müssen, um auf noch nicht umgesetztes Kalzium zu stoßen. Das bedeutet, dass alle über den Planeten verstreuten Betonstrukturen tatsächlich Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre ziehen und damit einen Teil der von ihnen verursachten Emissionen rückgängig machen. In ihrer Roadmap schätzt die Portland Cement Association, dass ältere Betonbauten bereits etwa 10 Prozent des CO₂ wieder aufgenommen haben, das bei ihrer Herstellung entstanden ist. Aber das sei eine bewusst konservative Zahl, sagt Bohan; andere Schätzungen gehen bis 43 Prozent. Der IPCC schätzt den Anteil in seinem 6. Sachstandsbericht »Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change« auf 15 bis 30 Prozent.

Für Bauherren ist die Karbonatisierung oft ein Feind, den es zu bekämpfen gilt – vor allem bei großen, schweren Bauteilen wie Fundamenten, Pfeilern und Stützmauern, die alle mit Stahlbewehrungen verstärkt werden müssen. Frischer Beton bietet ein alkalisches Umfeld, eine schützende Oxidschicht umgibt den dort eingebauten Stahl. In karbonatisiertem Beton jedoch laufen andere chemische Prozesse ab, und die Schutzschicht löst sich auf. Nun wird der Stahl anfällig für Rost und Korrosion, wodurch das Bauwerk schließlich einstürzen kann.

Dennoch sind in den letzten zehn Jahren mindestens ein halbes Dutzend Start-up-Unternehmen entstanden, die Technologien entwickelt haben, um die Karbonatisierung zu optimieren. Ihr Ziel ist es, Beton zu einem bedeutenden Speicher für atmosphärisches CO₂ zu machen.

Eines der etabliertesten von ihnen ist das in der kanadischen Provinz Nova Scotia ansässige Unternehmen CarbonCure. Die Firma hat weltweit bereits mehr als 700 Systeme verkauft, mit dem Betonhersteller industriell anfallendes CO₂ in frische, feuchte Betonmischungen einspritzen. Dort beginnt es sofort mit der Aufschlammung zu reagieren und innerhalb von Minuten bildet sich ein Schwall fester Kalziumkarbonat-Nanokristalle. Die Nanokristalle machen den Beton fester, wenn er aushärtet. Das bedeute, so CarbonCure, dass Bauherren rund fünf Prozent weniger Portlandzement verwenden können, ohne an Sicherheit einzubüßen. Darüber hinaus lässt sich die Betonmischung nach Angaben des Unternehmens mit gewöhnlichem Bewehrungsstahl kombinieren, da die festen Nanokristalle die schützende Oxidschicht nicht abbauen.

In Los Gatos in Kalifornien will die Firma Blue Planet Systems den CO₂-Ausstoß noch weitaus drastischer reduzieren. Sie konzentriert sich dazu nicht auf den Zementanteil des Betons, sondern auf den Zuschlagstoff: den inerten Füllstoff aus Sand oder Kies, der den größten Teil des Betonvolumens ausmacht. Das Verfahren ist Firmengeheimnis, aber die Grundidee ist einfach: Man nimmt ein beliebiges kalziumreiches Abfallprodukt wie Schlacke oder Betonschutt von einer Abbruchbaustelle, trinkt es in einer »Auffanglösung« und setzt es dem Abgas aus einem Zementofen, Kraftwerk, Stahlwerk oder einer anderen Emissionsquelle aus. Mit Hilfe der Lösung ziehen die Kalziumionen Kohlenstoffdioxid aus dem Rauchgas und binden es in Form von Kalziumkarbonat.

Die Lösung wird anschließend zurückgewonnen und wiederverwendet. Übrig bleiben feste Knollen, die zu 44 Prozent aus Kalziumkarbonat bestehen. Verwendet man sie als Zuschlagstoff, so Blue Planet, ergeben diese Knollen einen Beton, der genauso viel oder mehr Kohlenstoffdioxid gebunden hat, wie bei seiner Herstellung frei wurde: fast 670 Kilogramm pro Kubikmeter. Derzeit baut das Unternehmen seine erste Demonstrationsanlage im kalifornischen Pittsburgh.

Es bleibt abzuwarten, ob die Betonindustrie dank derlei Innovationen eines Tages wirklich unterm Strich kein CO₂ mehr ausstößt. Branchenbeobachter und Insider sind jedoch gleichermaßen optimistisch, und sei es nur, weil sich der Wandel so rasch beschleunigt. Noch vor rund zehn Jahren schien es keine praktikablen klimafreundlichen Alternativen zu Portlandzement zu geben, erinnert sich Andrew. Das Material war billig, bekannt und verfügte über eine riesige Infrastruktur – Hunderte von Steinbrüchen, Tausende von Brennöfen, ganze Flotten von Fahrern, die den vorgemischten Beton zu den Baustellen brachten. »Lange galt die Dekarbonisierung der Zementproduktion daher als zu schwierig«, sagt er.

Heute sei das anders, erklärt Bohan. Jetzt, mit der Klimakrise im Fokus der Aufmerksamkeit, träten die Leute einen Schritt zurück und entdeckten, welche vielfältigen Möglichkeiten ihnen bereits zur Verfügung stehen. ◀

QUELLEN

Andersson, R. et al.: Carbonation as a method to improve climate performance for cement based material. *Cement and concrete research* 124, 2019

Dimov, D. et al.: Ultrahigh performance nanoengineered graphene-concrete composites for multifunctional applications. *Advanced functional materials* 28, 2018

Ürge-Vorsatz, D. et al.: Advances toward a net-zero global building sector. *Annual Review of Environment and Resources* 45, 2020

Xi, F. et al.: Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nature Geoscience* 9, 2016

knowable MAGAZINE
1910 ANNUAL REVIEWS

Mit Genehmigung von »Knowable Magazine« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »<https://knowablemagazine.org/article/technology/2022/low-carbon-concrete>«.

Schreiben mit Strom

Mit zwei Elektroden, einer geeigneten Elektrolytlösung und einer Spannungsquelle lassen sich Botschaften und Skizzen zu Papier bringen – sogar in Farbe.

» [spektrum.de/artikel/2150688](https://www.spektrum.de/artikel/2150688)



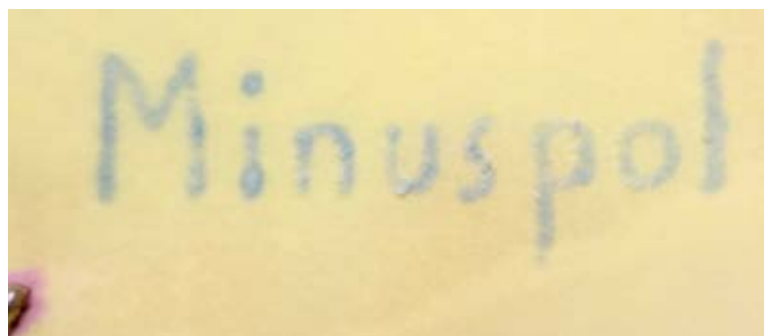
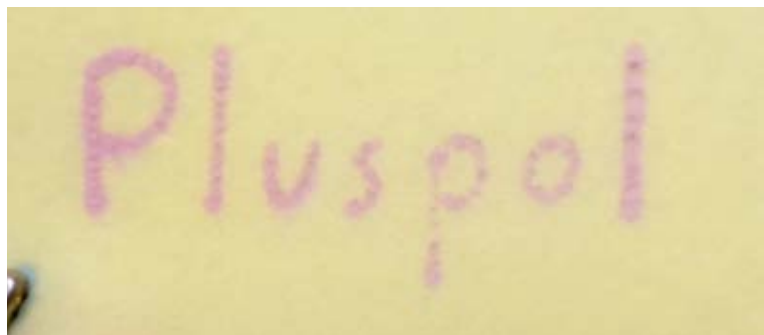
Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

▶ Ohne Batterien wäre unser heutiges Leben kaum vorstellbar. Weltweit wurden im Jahr 2021 Lithium-Ionen-Batterien mit einer Speicherkapazität von zusammengenommen zirka 500 Gigawattstunden verkauft: für kleine, tragbare Anwendungen wie Smartphones bis hin zu großen Akkus in elektrisch betriebenen Bussen oder Lastkraftwagen. Entscheidend für das Funktionieren solcher Stromspeicher – egal, ob groß oder klein – sind die chemischen Abläufe in ihrem Innern. Mit den entsprechenden Versuchen lassen sie sich direkt sichtbar machen.

Die erste leistungsfähige Stromquelle entwickelte Alessandro Volta (1745–1827), Professor der Physik an der Universität Pavia. Im Jahr 1799 konstruierte er aus über 60 Paaren von Zink- und Kupferplatten seine berühmte Volta-Säule: Jeweils eine Zink- und eine Kupferplatte lagen direkt aufeinander, in Kochsalz-Lösung getränkte Lederscheiben trennten die einzelnen Paare voneinander. Den oberen und unteren Abschluss der Säule bildeten eine einzige Kupfer- beziehungsweise Zinkplatte. Statt Zink und Kupfer verwendete der Forscher ebenso Zinn und Silber, später ersetzte er die Kochsalz-Lösung durch verdünnte Schwefelsäure. Das Interesse an seiner Säule war enorm. Selbst Napoleon Bonaparte ließ sie sich von ihrem Erfinder persönlich vorführen.

Der deutsche Chemiker Johann Wilhelm Ritter (1776–1810) erkannte, dass die Stromproduktion in dieser Anordnung auf chemischen Reaktionen beruht. Er experimentierte ausführlich mit der durch die Volta-Säule so einfach zu erzeugenden Elektrizität und schonte dabei seine eigene Gesundheit nicht, sondern malträtierte unter

ELEKTROCHEMISCHES SCHREIBEN auf einem Filterpapier, das mit einer Kaliumnitrat-Lösung und einem Gemisch aus Methylrot- und Thymolphthalein-Lösung getränkt wurde. Auf den Bildern ist links unten die Spitze der Krokodilklemme zu sehen. In ihrem Umfeld erkennt man die jeweils andere Färbung des Elektrolyten.



MATTHIAS DUCCI



HIN UND WEG Elektrochemisches Schreiben (oben) und Löschen (unten) mit Phenolphthalein als pH-Indikator.

anderem seine Augen, Zähne und Ohren mit elektrischen Stromstößen. Die Auswirkungen, wie Lichtblitze und Schmerzen, notierte er akribisch.

Schonendere Experimente stellten der englische Naturforscher William Nicholson (1753–1815) und Anthony Carlisle (1768–1840), Chirurg und Professor für Anatomie in London, an. Schon Volta hatte beobachtet, dass beim Befeuchten der obersten Scheibe seiner Säule ein Gas entstand. Also bauten die beiden Wissenschaftler eine Volta-Säule aus Zink- und Silberplatten und befestigten an beiden Enden jeweils einen Platindraht, der in ein kopfüber stehendes, wassergefülltes Gefäß in einer wassergefüllten Wanne ragte. Ein solches Vorgehen bezeichnet man als pneumatisches Auffangen von Gasen. An beiden Platindrähten entwickelte sich ein Gas und sammelte sich in den Gefäßen. Wie weitere chemische Untersuchungen zeigten, hatte sich an der Zinkseite Wasserstoff und an der Silberseite Sauerstoff gebildet. Das Ergebnis belegt übrigens, dass bei den Versuchen kein destilliertes Wasser verwendet wurde, denn dieses würde den elektrischen Strom nicht leiten.

Nicholson und Carlisle führten damit also die ersten Wasserelektrolysen durch. Bei einer Elektrolyse erzwingt man eine Redoxreaktion durch elektrischen Strom. Zu jener Zeit war schon bekannt, dass Wasser eine Verbindung aus Wasserstoff und Sauerstoff ist. Da jedoch in einem Gefäß nur Wasser- und in dem anderen nur Sauerstoff aufgefangen wurde (und nicht etwa ein Gemisch aus beiden Gasen), mussten noch weitere Produkte entstanden sein, denn an den Drähten wurden jeweils Wassermoleküle (H₂O) umgesetzt. Wo war das jeweils andere in Wasser gebundene Element verblieben?

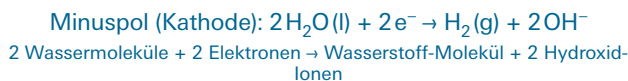
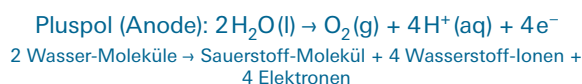
Worum es sich bei den weiteren Produkten handelte, fand der berühmte englische Chemiker Humphry Davy

(1778–1829) heraus. Er untersuchte systematisch die Erscheinungen bei der Elektrolyse einer Vielzahl von Salzlösungen (und Salzschnmelzen, siehe »Spektrum« August 2019, »Die lange Jagd nach den verborgenen Metallen«, ab S. 68). In seiner Apparatur steckten die beiden Platindrähte in zwei unterschiedlichen Flüssigkeitsbehältern, die über eine Elektrolytbrücke miteinander verbunden waren. Dabei stellte er fest, dass man bei bestimmten Salzlösungen neben der Gasentwicklung »in dem positiven Becher eine bedeutende Menge von Säure« und »am negativen Draht« eine schwache Lauge findet.

Diese Prozesse lassen sich für ein eindrucksvolles Experiment nutzen: das elektrochemische Schreiben. Man benötigt einen 9-Volt-Block, eine Petrischale, ein Rundfilterpapier, Kaliumnitrat-Lösung (Konzentration: 0,1 mol/Liter; Kaliumnitrat ist hier der Leitelektrolyt), zwei Kabel, drei Krokodilklemmen, eine stabförmige Kupferelektrode mit abgerundeter Spitze, ein stabiles Stück Plastikfolie (10 x 10 Zentimeter, beispielsweise aus der Deckfolie eines Schnellhefters ausgeschnitten) und eine Pinzette. Als pH-Indikatorlösung eignen sich Methylrot und Thymolphthalein (jeweils 0,1-prozentige ethanolische Lösungen). Eine wässrige Methylrot-Lösung ist oberhalb von pH 6,2 gelb, unterhalb von pH 4,4 pink, dazwischen orange. Eine wässrige Thymolphthalein-Lösung ist farblos und wird bei einem pH-Wert von über 10,5 blau.

In die Petrischale gießt man 10 Milliliter der Kaliumnitrat-Lösung und fügt je 40 Tropfen der Indikatorlösungen hinzu. Das Filterpapier hält man mit Hilfe der Pinzette in die Lösung, so dass es sich vollsaugt, und legt es anschließend auf die Folie. Mittels Krokodilklemmen und einem Kabel verbindet man das Filterpapier nun mit dem Minuspol der Batterie, die Kupferelektrode mit dem Pluspol. Nun fährt man mit der Elektrode langsam und ohne starken Druck auszuüben über das Filterpapier. Dabei werden rötliche Striche beziehungsweise Buchstaben sichtbar. Vertauscht man die Polung, ist die Schrift blaugrün (Mischfarbe aus Blau und Gelb). Weil nur wenig Stoff umgesetzt wird, lässt sich keine Gasentwicklung beobachten.

Aus den Beobachtungen folgt, dass bei der Elektrolyse am Pluspol Wasserstoff-Ionen (H⁺-Ionen) und am Minuspol Hydroxid-Ionen (OH⁻-Ionen) auf dem Filterpapier entstanden sind. Somit lassen sich die Teilreaktionen der Wasserelektrolyse wie folgt formulieren (»l«, »g« und »aq« stehen für »flüssig«, »gasförmig« und »in Wasser gelöst«):



Etwaige Nebenreaktionen wie die Reduktion von Nitrat-Ionen durch naszierenden Wasserstoff – der sich in der Lösung bildet und direkt weiterreagiert – sind für das Phänomen unerheblich und werden hier nicht berücksichtigt.



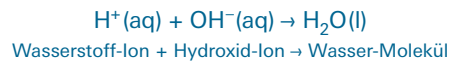
MATTHIAS DUCCI

KUPFERBÄUMCHEN Bei der Elektrolyse einer Kupfer(II)-sulfat-Lösung scheidet sich an der Kathode elementares Kupfer als »Bäumchen« ab.



MATTHIAS DUCCI

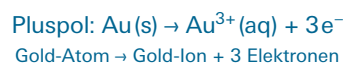
Mit Phenolphthalein als pH-Indikator (20 Tropfen 0,1-prozentige ethanolische Phenolphthalein-Lösung in 10 Milliliter Kaliumnitrat-Lösung der obigen Konzentration) gelingt eine Variante des elektrochemischen Schreibens besonders gut. Das hiermit getränkte Filterpapier bleibt weiß. Zunächst wird mit dem Minuspol geschrieben. Beim Schreiben erscheinen die Buchstaben rosa, da Phenolphthalein bei pH 8,2 von farblos nach Rosa umschlägt. Nun polt man um und fährt die farbigen Buchstaben langsam nach. Dabei entfärben sich diese vollständig (siehe »Hin und weg«). Denn die entstehenden Wasserstoff-Ionen reagieren jetzt mit den zuvor gebildeten Hydroxid-Ionen und neutralisieren die Lösung:



Auf diese Weise wird der pH-Wert gesenkt, und Phenolphthalein nimmt wieder seine farblose Form an.

Der Militärarzt und Chemieprofessor an der Royal Military Academy in Woolwich, William Cruickshank (1740/1750–1810/1811), stellte ebenfalls Elektrolyseversuche mit der Volta-Säule an. Er war der Erste, der berichtete, wie sich bei der Elektrolyse Metalle am Pluspol auflösen: »Anfangs erhob sich am [Gold]Drahte des Silberendes wenig oder gar kein Gas, obgleich es augenblicklich in beträchtlicher Menge am Drahte von der Zinkseite aufstieg. Um diesen färbte sich die Flüssigkeit mit dem schönsten Gelb, indem hier der Golddraht aufgelöst wurde und zu Ende des Prozesses sehr stark zerfressen war.«

Während sich somit am Minuspol wieder Wasserstoff entwickelte (Reaktionsgleichung siehe S. 69), wurde am Pluspol Gold anodisch oxidiert (das Symbol »s« steht für »fest«):



Demnach sollten bei den oben beschriebenen Experimenten neben den anderen Produkten auch Kupferionen entstanden sein, denn an Stelle eines Golddrahts wurde eine Kupferelektrode verwendet. Um diese Hypothese zu überprüfen, führt man den Versuch »Elektrochemisches Schreiben« erneut durch. Als Elektrolyt dienen diesmal 10 Milliliter Kaliumnitrat-Lösung, in der 0,5 Gramm Kaliumhexacyanidoferrat(II) (gelbes Blutlaugensalz, ein Nachweisreagens unter anderem für Kupfer-Ionen) gelöst werden. Schreibt man jetzt mit der Kupferelektrode, die mit dem Pluspol der Batterie verbunden ist, tauchen rotbraune Buchstaben auf. Sie bestehen aus Kupfer(II)-hexacyanidoferrat(II). Kupfer-Atome aus der Elektrode werden also zu Kupfer-Ionen oxidiert:



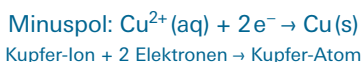


MATTHIAS DUCCI

BROMIERUNG Elektrochemisches Schreiben auf Filterpapier, das mit einer wässrigen Lösung aus Uranin und Kaliumbromid getränkt ist. Rechts die Kupferelektrode, unten die Krokodilklemme.

Cruickshank machte noch eine weitere spektakuläre Entdeckung. Dort, »wo an Stelle von Wasser metallische [Salz]Lösungen verwendet werden, belebt derselbe Draht, an dem der Wasserstoff entsteht, den metallischen Kalk [Metallsalz] und lagert ihn am Ende des Drahtes in seinem reinen metallischen Zustand ab.«

Ein einfaches Experiment lässt uns diese Beobachtung wiederholen. Hierzu braucht man eine Petrischale, drei Büroklammern, zwei Kabel, zwei Krokodilklemmen, Kupfersulfat-Lösung (Konzentration: 1 mol/Liter) und eine Gleichspannungsquelle. Für die Elektrolyse wird die Petrischale so mit der Kupfersulfat-Lösung befüllt, dass der Boden gerade mit Flüssigkeit bedeckt ist. Die eine Büroklammer schließt man mit Hilfe einer Krokodilklemme und eines Kabels an den Minuspol der Spannungsquelle an, taucht sie in die Lösung (sie darf den Boden der Petrischale berühren) und befestigt sie am Rand der Schale mit einer zweiten Büroklammer. Die dritte Büroklammer wird an den Pluspol angeschlossen und in die Lösung gehalten, wobei der Abstand zur anderen Büroklammer 0,5 bis 1 Zentimeter betragen sollte. Die Spannungsquelle sollte zirka 15 Volt liefern. An der als Pluspol geschalteten Büroklammer entwickelt sich ein Gas: Sauerstoff. An der anderen Büroklammer scheidet sich Kupfer in Form fraktaler Strukturen, so genannter Kupferbäumchen, ab:

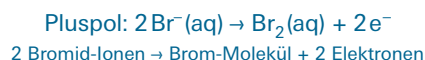


Bewegt man die Anode – vorsichtig, um die Strukturen nicht zu zerstören –, lässt sich die Wachstumsrichtung steuern.

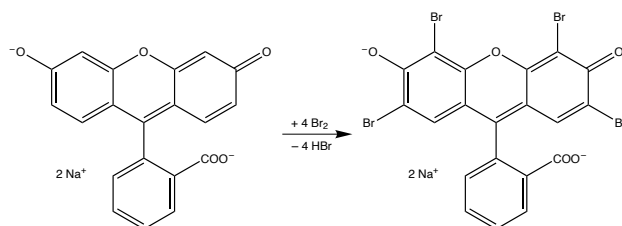
Die kathodische Abscheidung von Kupfer ist bis heute ein Teilprozess bei der Kupfergewinnung (Kupferraffination). Auch um Aluminium, Wasserstoff sowie Chlor und Natronlauge (Chlor-Alkali-Elektrolyse) zu gewinnen, setzt man die Elektrolyse im großtechnischen Maßstab ein. Außerdem dienen elektrolytische Verfahren zunehmend dazu, gezielt organische Verbindungen herzustellen (»Spektrum« November 2022, »Strom, marsch!«, ab S. 56). Dadurch lässt sich auf chemische Oxidations- und Reduktionsmittel weitgehend verzichten, weil der elektrische Strom deren Aufgabe übernimmt.

Ein einfaches Modellexperiment dazu stellt die Bromierung von Fluorescein zu Eosin Y dar. Dazu benötigt man dieselben Materialien wie beim ersten Versuch. Als Elektrolyt, mit dem das Filterpapier benetzt wird, dient eine Kaliumnitrat-Lösung, in der 0,02 Gramm Fluorescein (Dinatriumsalz, so genanntes Uranin) und 0,2 Gramm Kaliumbromid gelöst sind. Die Kupferelektrode wird mit dem Pluspol der Batterie verbunden, der Minuspol mit Hilfe eines Kabels und einer Krokodilklemme an das Filterpapier geheftet. Beim Schreiben erscheinen rötliche Buchstaben auf dem Filterpapier.

An der Kathode entstehen in nicht sichtbaren Mengen Wasserstoff-Moleküle und Hydroxid-Ionen. An der Anode scheidet sich Brom ab:



Das entstandene Brom reagiert sofort mit Uranin zu Tetrabromofluorescein (Eosin Y). Mit Strukturformeln sieht der Gesamtreaktionsablauf wie folgt aus:



MATTHIAS DUCCI

Diese elektrochemische Vorgehensweise hat den Vorteil, dass man vollständig auf die problematischen Chemikalien Brom und Bromwasser verzichten kann, die man beim konventionellen Versuch ohne Elektrolyse benötigen würde. ◀

QUELLEN

Brenner, T. et al.: Elektrochemisches Schreiben & Löschen und noch mehr! CHEMKON 19/3, 2012

Cruickshank, W.: Fortgesetzte Beobachtungen über chemische Wirkungen der galvanischen Electricität. Annalen der Physik 7, 1801

Wilkinson, C. H.: Elements of galvanism in theory and practice 2, 1804

Energie effizienter speichern

Wie Batterien grundsätzlich funktionieren, ist schon lange bekannt. Sie exakt zu beschreiben, gestaltet sich allerdings als Mammutaufgabe. Mathematische Modellierung hilft dabei, die Geräte zu verstehen und dadurch zu verbessern.

» spektrum.de/artikel/2150679



Manuel Landstorfer (links) und **Martin Heida** sind Mathematiker und Wissenschaftler am Weierstraß-Institut für angewandte Analysis und Stochastik (WIAS) in Berlin.



AUF EINEN BLICK

Mathematische Batteriemodelle

- 1** Seit Jahrhunderten sind die chemischen Prozesse bekannt, mit denen man zumindest kleine Mengen Energie speichern und wieder abführen kann.
- 2** Um die Vorgänge besser zu verstehen, muss man die thermodynamischen Abhängigkeiten auf verschiedenen Größen- und Zeitskalen beachten.
- 3** Mit Hilfe mathematischer Modelle versuchen wir, Batterien im Detail zu simulieren und so Eigenschaften wie ihre Lebensdauer und Kapazität zu verbessern.

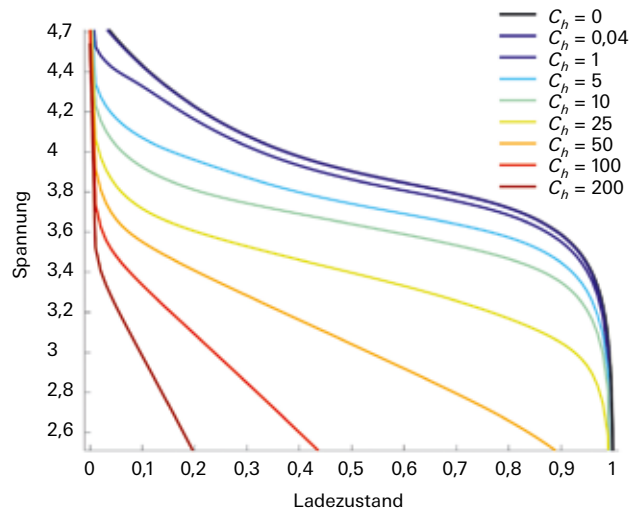
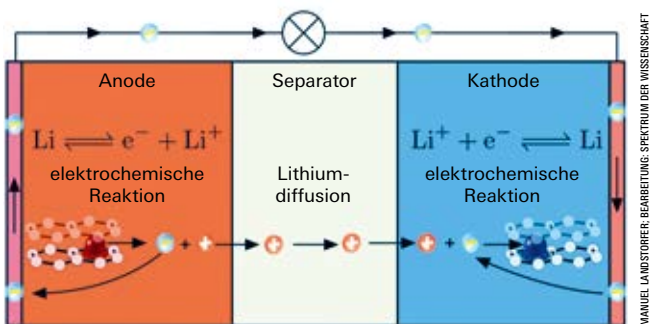
**ENERGIE-
WENDE** Für die optimale Nutzung der regenerativen Energien brauchen wir leistungsfähige Speicher.

Es ist eines der größten Probleme der anstehenden Energiewende: Insbesondere durch die Umstellung auf Wind- und Solarenergie hängt die Stromerzeugung von den Witterungsbedingungen ab. Ebensovienig ist der Energieverbrauch konstant, sondern schwankt stark über die Tageszeit. Mit ausreichend großen Batterien ließe sich eine Versorgung mit regenerativem Strom rund um die Uhr garantieren. Auch in der Elektromobilität gibt es Bedarf an immer besseren Speichermöglichkeiten für Elektrizität. Darüber hinaus stellt sich vor allem bei großen und teuren Energiespeichern die Frage der Haltbarkeit.

Um die heutigen Batterien zu verbessern, muss man die Prozesse in ihrem Inneren verstehen. Obwohl die grundsätzliche Funktionsweise schon seit mehreren Jahrhunderten bekannt ist, steckt der Teufel im Detail: Zum Beschreiben aller Vorgänge, die sich auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene abspielen, braucht man komplizierte mathematische Modelle, die sich nicht ohne Weiteres lösen lassen. Deswegen greifen Fachleute tief in die Trickkiste und nutzen Näherungsverfahren, computergestützte Simulationen und maschinelles Lernen, um möglichst präzise Modelle von Batterien zu entwickeln. Dadurch können wir Herstellungsprozesse verbessern und die Lebenszeit der Geräte verlängern.

Die Idee, elektrische Energie zu speichern, blickt auf eine lange Geschichte zurück. Bereits um 250 v. Chr. wurde in Mesopotamien mit elektrochemischen Prozessen experimentiert, wie der Fund der so genannten Bagdad-Batterie nahelegt – ein Tongefäß, das einen Kupferzylinder und Eisenstäbchen enthält. Bis zur ersten Strom liefernden Batterie vergingen aber noch etwas mehr als 2000 Jahre: Um 1800 stellte Alessandro Volta erstmals einen Stromspeicher aus Kupfer- und Zinkelementen in einer Salzlake vor. Inspiriert hatten ihn die Experimente von Luigi Galvani, der kurz zuvor entdeckt hatte, dass sich die Muskeln von toten Fröschen zusammenziehen, wenn man sie mit unterschiedlichen Metallen in Kontakt bringt. Darauf aufbauend entwickelte der Erfinder Thomas

LITHIUM-IONEN-BATTERIE Die Elektronen fließen anders als die Ionen nicht durch den Separator zwischen den beiden Elektroden, sondern entlang eines äußeren Stromkreises, wo sie einen Verbraucher antreiben können.



SPANNUNG EINER BATTERIE Beispielhafte Simulation der Spannung abhängig vom Ladezustand und der Laderate (C_r) eines Akkus.

Davenport 1835 – lange bevor es Verbrennungsmotoren gab – das erste elektrische Fahrzeug, das eine Geschwindigkeit von 12 Kilometer pro Stunde erreichte.

Doch die Volta-Batterie hatte einen erheblichen Nachteil: Sie konnte nur ein einziges Mal entladen werden – weshalb sie für viele praktische Anwendungen ungeeignet war. Diese Unzulänglichkeit beseitigte Gaston Planté 1859, als er einen Blei-Säure-Stromspeicher präsentierte, der sich aufladen ließ. Solche Akkumulatoren (kurz: Akkus) werden oft synonym als Batterie bezeichnet.

Im 20. Jahrhundert ging man zu nickelbasierten Batterien über, die auch heute noch Anwendung finden. Inzwischen wurden sie jedoch größtenteils durch die in den 1970er und 1980er Jahren entwickelten Lithium-Ionen-Akkus ersetzt. Diese setzen vollkommen neue Maßstäbe hinsichtlich Speicherkapazität, Leistung und Haltbarkeit, weshalb ihre Erfinder, John B. Goodenough, Stanley Whittingham und Akira Yoshino, 2019 den Nobelpreis für Chemie erhielten.

Weil die Batterien zudem wesentlich mehr elektrische Ladung pro Gewicht und Volumen speichern können als bisherige, eignen sie sich besonders gut für mobile Anwendungen. Allerdings waren erst ab 1991 kommerzielle und massentaugliche Lithium-Ionen-Batterien verfügbar. Mittlerweile sind Li-Akkus in zahlreichen Geräten wie Smartphones und Elektroautos verbaut und werden stetig weiterentwickelt, um Speicherkapazität, Haltbarkeit und Sicherheit zu erhöhen. Gleichzeitig versuchen Forscherinnen und Forscher, das Gewicht der Stromspeicher zu verringern und sie umweltfreundlicher zu gestalten.

Dafür muss man die verwendeten Materialien, deren Beschaffenheit und die elektrochemischen Mechanismen beim Lade- und Entladevorgang extrem gut verstehen. Eine Möglichkeit bieten mathematische Modelle, welche die thermodynamischen Vorgänge auf allen Größenskalen

beschreiben. Bereits 1975 – also nahezu parallel zur Entwicklung des ersten Li-Ionen-Akkus – hat der Chemiker John Newman erstmals eine poröse Elektrode modelliert. Inzwischen hat sich die Modellierung von Batterien zu einem dynamischen Forschungsfeld entwickelt, in dem Ansätze aus der Informatik, Mathematik, Physik und Chemie zusammenkommen.

Wie bei fast allen modernen Forschungsbereichen setzen Fachleute auch in der Batterieentwicklung inzwischen auf computergestützte Methoden, weil sich die komplizierten Modelle nicht von Hand berechnen lassen. Doch um die Prozesse korrekt simulieren zu können, braucht ein Computer eine möglichst genaue – und effektive – mathematische Beschreibung. Dafür muss man die wesentlichen Vorgänge beim Laden und Entladen identifizieren und in entsprechende Formeln übersetzen.

Das richtige Gleichgewicht aus Vereinfachung und Berechenbarkeit finden

Je präziser das Modell ist, desto bessere Schlüsse lassen sich ziehen. Häufig sind die Gleichungen dann allerdings aufwändig zu lösen: Die Simulationen müssen daher auf extrem leistungsfähigen Computern laufen. Deshalb versuchen wir, die Modelle systematisch zu vereinfachen und eine Balance aus Präzision und Rechenaufwand zu finden.

Zunächst muss man aber verstehen, wie sich elektrische Energie überhaupt speichern lässt. Eine Li-Batterie besteht, vereinfacht dargestellt, aus zwei Elektroden: einer Anode und einer Kathode, die durch einen Elektrolyt oder Separator getrennt sind. Die Elektroden bestehen aus Materialien, die Lithiumatome in ihrer molekularen Struktur speichern können. Beim Entladen spaltet sich das in der Anode gespeicherte Lithium in ein Lithium-Ion

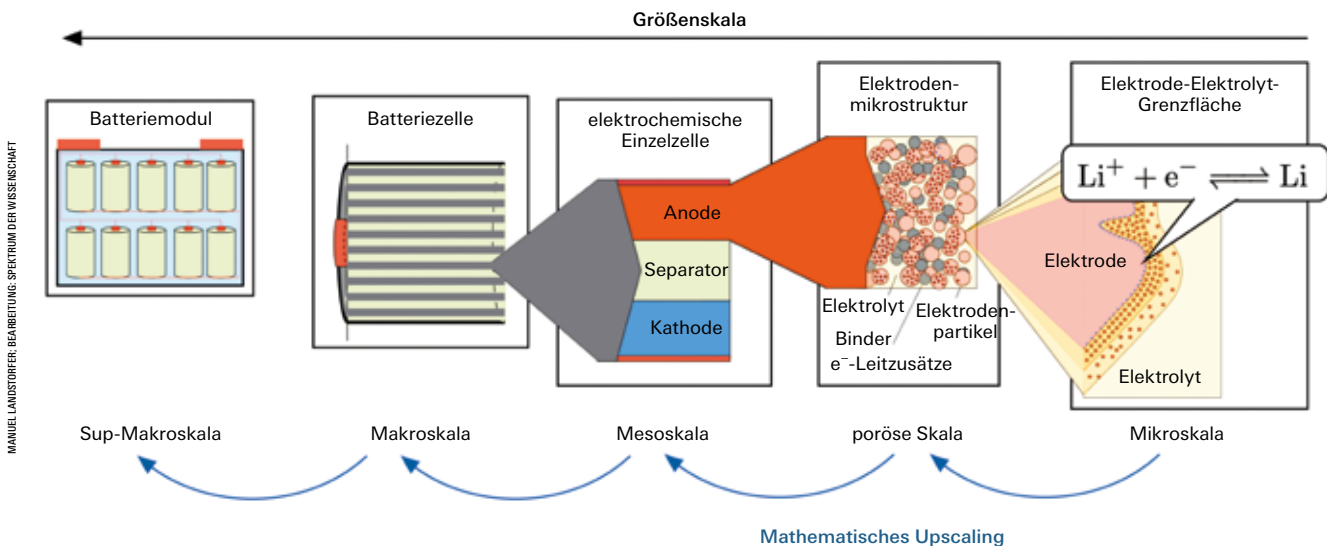
und ein Elektron auf. Das positiv geladene Ion fließt im Inneren der Batterie durch den Elektrolyt zur Kathode, während sich das Elektron über einen äußeren Stromkreis bewegt und dabei einen elektrischen Verbraucher antreibt – etwa ein Smartphone. In der Kathode verbinden sich das Lithium-Ion und das Elektron wieder und lagern sich als ungeladenes Lithiumatom ab. Da die Prozesse weitestgehend reversibel sind, laufen sie beim Laden umgekehrt ab. Das Lithium wird also zwischen Anode und Kathode hin- und hergeschaukelt, weshalb Li-Batterien manchmal als Schaukelstuhl-Batterien (englisch: rocking chair battery) bezeichnet werden.

Eine Batterie liefert nicht nur Strom, sondern erzeugt auch eine Spannung, die bei lithiumbasierten Geräten typischerweise zwischen etwa 3,5 und 4,5 Volt beträgt. Diese variiert aber mit dem Ladezustand: Ist der Akku voll geladen ($\gamma = 1$), gibt er 4,5 Volt ab, ist er hingegen fast leer ($\gamma = 0$), sind es bloß 3,5 Volt. Warum das so ist, lässt sich mit der Analogie eines Stausees erklären: Das Wasser erzeugt einen hydrostatischen Druck (Spannung), der von der Höhe des Wasserstands (Ladezustand) abhängt. Im Abflussrohr ist eine Turbine angebracht, mit der sich ein Verbraucher antreiben lässt, wobei der Wasserfluss durch das Rohr dem Stromfluss einer Batterie entspricht.

Zum Bestimmen des aktuellen Ladezustands eines elektronischen Geräts braucht man daher nur die Spannung der Batterie zu messen – so macht es etwa Ihr Smartphone, wenn es Ihnen mitteilt, dass es bald geladen werden muss.

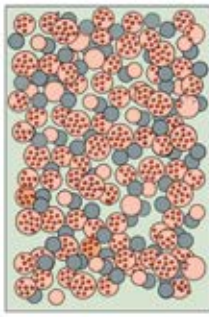
Um Akkus unterschiedlichen Typs, Alters oder verschiedener Größe miteinander zu vergleichen, dient die so genannte C-Rate C_h . Sie lässt sich durch das Verhältnis des abgegebenen Stroms I zum charakteristischen Strom I^0 (die Menge an Strom, um einen Speicher innerhalb einer Stunde zu laden) berechnen: $C_h = I/I^0$. Eine C-Rate von $C_h = 2$ bedeutet, dass eine Batterie in einer halben Stunde ge- beziehungsweise entladen wird. Ent-

MULTISKALEN-PROBLEM Übersicht der verschiedenen Größenskalen innerhalb einer Lithium-Ionen-Batterie.



MANUEL LANDSTÖRER, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

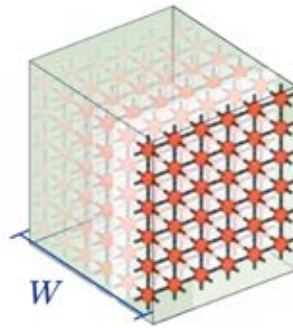
reale poröse Struktur



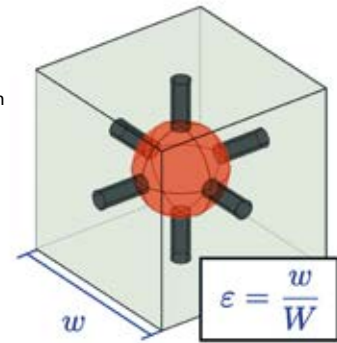
Idealisierung



idealisierte poröse Struktur

periodische
Wiederholung von
Einheitszellen

repräsentative Einheitszelle



ELEKTRODE Übergang von einem realen porösen Medium zu einer periodischen Approximation mit repräsentativer Einheitszelle.

sprechend ergibt sich für eine C-Rate von $C_h = 0,5$ eine Ladedauer von zwei Stunden.

Die Spannung einer Batterie hängt allerdings nicht nur von ihrem Ladezustand y ab, sondern auch vom momentanen Stromfluss. Sobald Strom fließt, verringert sich die Spannung: Während eine volle Batterie bei kleinen Entladeströmen etwa 4,3 Volt liefert, kann sie bei starken nur 3,8 Volt erzeugen. Somit gibt es eine komplizierte Verbindung zwischen der Spannung, dem Ladezustand und der C-Rate C_h . Ein Ziel der Modellierung ist es, diese Zusammenhänge präzise vorherzusagen.

Damit das gelingt, muss man die komplexen Prozesse, die in den Elektroden ablaufen, genau verstehen. Und davon gibt es nicht gerade wenige: In den Batterien kommt es zu Diffusion, Wärmetransport und chemischen Reaktionen – bei manchen Batterietypen gibt es außerdem Strömungen im Elektrolyt, Phasenübergänge und mechanische Effekte. Zudem ist die poröse Struktur der Materialien von zentraler Bedeutung. All das wirkt sich auf die Spannung und den Ladezustand der Batterie aus sowie auf den Einfluss der C-Rate. Um die genannten Phänomene zu beschreiben, braucht man partielle Differentialgleichungen. Diese geben an, wie sich eine Größe bezüglich der Zeit und des Orts ändert. Außerdem hängen die Variablen – und damit auch die unterschiedlichen Gleichungen – voneinander ab. Was es noch komplizierter macht: Die Zusammenhänge sind meist nichtlinear,

weshalb sie sich nicht exakt lösen lassen. Die Forschung ist somit auf computergestützte Methoden angewiesen.

Doch schon beim Erstellen des Modells gilt es vorsichtig zu sein: Während die physikalischen Gesetze für einzelne Phänomene wie Wärmetransport, Diffusion und chemische Reaktionen bekannt sind, muss man bei einer Kopplung der Prozesse insbesondere zwei Sätze aus der Thermodynamik beachten: Die Gesamtenergie des Systems bleibt stets erhalten und die Entropie (ein Maß für Unordnung auf molekularer Ebene) nimmt immer zu. Jedes Gleichungssystem, das eine dieser Regeln verletzt, ist unphysikalisch.

Der Stromfluss der Batterie leitet sich aus thermodynamischen Größen ab, etwa der Freien Energie. In der Stausee-Analogie entspricht diese der Höhe des Wasserstands über dem Meeresspiegel. Öffnet sich die Schleuse, fließt das Wasser den Weg des geringsten Widerstands entlang durch das umliegende Gelände ins Meer. Die Fließrichtung des Wassers folgt immer dem steilsten Abstieg der Landschaft – Mathematikerinnen und Mathematiker bezeichnen das als Gradienten.

Vom Modul im Elektroauto bis zur Elektrode: Eine Batterie hat viele Ebenen

Solche Gradienten-Strukturen bringen viele Vorteile mit sich, weil sie gut verstanden sind. Somit kann man die zwei wichtigsten theoretischen Fragen der Modellierung untersuchen: Ist das Modell physikalisch plausibel? Und: Wie verhält sich das System langfristig? Darüber hinaus lassen sich Gradienten-Strukturen meist vereinfachen, um die dazugehörigen Gleichungen beispielsweise mit einem Computer zu lösen. Das ist vor allem dann wichtig, wenn sich die Systeme über mehrere Größenordnungen erstrecken – wie es bei Batteriezellen der Fall ist.

Moderne Lithium-Ionen-Batterien sind nämlich Multi-skalen-Objekte: In einem Elektroauto steckt ein Modul, das aus zahlreichen miteinander verschalteten Zellen besteht, die jeweils ein gewickeltes Band aus elektrochemischen Einzelzellen enthalten. Diese setzen sich aus einer Anode und einer Kathode zusammen, die durch einen Separator voneinander getrennt sind. Die Elektroden sind porös, wie ein Schwamm. Damit haben sie eine

Die verschiedenen Größenskalen führen zu Gleichungen, die man nur näherungsweise lösen kann

große Oberfläche im Vergleich zu ihrem Volumen. Das ist ähnlich zu einem A4-Blatt Papier, das man zu einer Kugel zusammenknüllt: Die Kugel (das poröse Medium) hat ein kleines Volumen, aber die Oberfläche entspricht den Abmessungen des A4-Blatts. Die große Fläche ist notwendig, weil das Ein- und Auslagern von Lithium – das Herzstück der Batterie – an der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt stattfindet. Je größer die Fläche, desto höhere Ströme liefert der Akku.

Aus dem Blickwinkel der Mathematik führen die unterschiedlichen Größenskalen zu einem komplizierten System aus Differenzialgleichungen, die sich mit Computersimulationen lösen lassen. Hierfür teilt man den Raum in lauter kleine Zellen auf (Dreiecke bei Flächen, Tetraeder bei Volumen) und bestimmt die darin entscheidenden Größen (Lithium-Konzentration, Temperatur, elektrisches Potenzial und so weiter). Jede Variable entspricht einem Freiheitsgrad – bei einer Elektrode aus zirka zehn Millionen Teilchen kommen schnell zehn Milliarden Freiheitsgrade zusammen, was selbst modernste Supercomputer überfordert.

Grund für die enorme Komplexität ist die Mikrostruktur der Elektroden. Daher gilt es, die Details zu vereinfachen. Durch einen neuen mathematischen Ansatz, der als Homogenisierungstheorie bekannt ist, konnten wir die poröse Struktur annähern, indem wir repräsentative Einheitszellen ausgemacht haben. Diese haben wir dann wiederholt angeordnet, wodurch man eine periodische Struktur erhält, die sich deutlich einfacher untersuchen lässt. Aus mathematischer Sicht lassen sich zwar auch

nichtperiodische Fälle behandeln. Es zeigt sich jedoch, dass die entstehenden Gleichungen sehr ähnlich zur simpleren, periodischen Situation sind.

Ziel der Homogenisierung ist es, ein Modell zu erstellen, das von mehreren Größenskalen abhängt. Hierfür wird in einer Funktion $u(x, t)$ die Ortskoordinate x durch zwei verschiedene Ortsskalen ersetzt: die Makroskala x und die Mikroskala x/ε , wobei ε das Verhältnis der Größe der Batteriezelle zur Einheitszelle darstellt. Durch diesen Ansatz lösen sich einige Abhängigkeiten auf: Die thermodynamischen Gleichungen, welche die Batterie beschreiben, hängen nicht mehr von der Mikrostruktur ab. Die geometrische Struktur des porösen Mediums tritt nur noch in bestimmten Parametern auf, die man über dreidimensionale Simulationen berechnet. Dadurch vereinfacht sich das Modell enorm. Die Anzahl der Freiheitsgrade sinkt um mehrere Größenordnungen, wodurch auch gewöhnliche Computer mit den Systemen umgehen können.

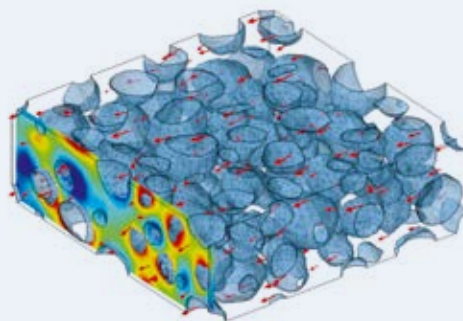
Somit ist es uns gelungen, ein mathematisches Modell einer Batterie aus physikalischen Prinzipien herzuleiten. Doch ein wichtiger Schritt fehlt noch: Um damit Vorhersagen für reale Geräte zu machen, müssen die Gleichungen gelöst werden. Hierfür gibt es verschiedene computergestützte Methoden, die sich als bereits fertige Pakete in verbreiteten Programmiersprachen wie Python oder Matlab finden.

Somit lässt sich das Abbild einer Batterie am Computer erzeugen, was häufig als digitaler Zwilling bezeichnet wird. Es hängt meist von unbekanntem Parametern ab, die

Homogenisierung

Ein typisches Problem in der Homogenisierung ist Diffusion in komplexen Materialien. Diffusion ist dabei die übliche Art der Fortbewegung von Molekülen. Wenn $u(x)$ eine eindimensionale Verteilung von Molekülen angibt, so ist die Geschwindigkeit $j(x) = a(x) \cdot u'(x)$ der Diffusion durch den Diffusionskoeffizienten $a(x)$ bestimmt und durch die Ableitung (Veränderung) $u'(x)$. Je größer a , desto schneller bewegen sich die Moleküle. Wir betrachten nun ein a , das periodisch ist, es gilt also $a(x+1) = a(x)$. Für eine kleine Zahl $\varepsilon > 0$ definieren wir $a_\varepsilon(x) = a(x/\varepsilon)$, für die $a_\varepsilon(x+\varepsilon) = a_\varepsilon(x)$ gilt.

Wenn die Werte von a stark schwanken, werden die Moleküle auf einer kurzen Strecke von ε immer wieder stark beschleunigt und erneut gebremst. Die Homogenisierungsfrage ist nun, ob es ein konstantes a_0 gibt, das auf einer Strecke (etwa von 0 bis 1) die gleiche effektive Ausbreitungsgeschwindigkeit der Moleküle liefert wie a_ε . In diesem einfachen Beispiel könnte man zunächst vermuten, dass das geeignetste a_0 einfach der Mittelwert von a ist. Es stellt sich jedoch heraus, dass $1/a_0$ der Mittelwert von $1/a$ ist: a_0 ist dann besonders stark von den kleinsten Werten von $a(x)$ bestimmt, während große Werte von $a(x)$ oft kaum ins Gewicht fallen. Bildlich liegt das daran, dass kleine Werte wie ein Flaschenhals wirken, an dem sich die Moleküle stauen. Man kennt das auch aus einem anderen Kontext: Sobald auf der Autobahn ein Stau ist, bestimmt dieser die Reisedauer.



NÄHERUNGSVERFAHREN Computergestützte Homogenisierung des dreidimensionalen Zellproblems.

MANUEL LANDSTORFER, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Durch mathematische Modellierung werden aufwändige Experimente durch Simulationen ersetzt

durch geeignete Labormessungen bestimmt werden. In der Regel lädt und entlädt man die Geräte dafür immer wieder. Anschließend stellt man die Parameter des digitalen Zwillings so ein, dass sie am Computer dasselbe Verhalten zeigen wie die echte Batterie.

Danach ist es möglich, modellbasierte Vorhersagen zu machen – abhängig vom Stromprofil. Dieser Punkt ist für viele Anwendungen wichtig, denn ein Elektrofahrzeug verändert während des Fahrens beispielsweise kontinuierlich seine Stromstärke: Wird das Gaspedal gedrückt, übersetzt eine Regelungstechnik das in einen entsprechenden Strom, der das Fahrzeug beschleunigt und die Batterie entlädt. Durch die Bremskraftrückgewinnung wird der Akku beim Bremsen wieder geladen, was zu einem negativen Strom führt. Mit den Modellen lassen sich damit viele Aspekte der Batterie untersuchen und verbessern, ähnlich wie bei der computergestützten Formoptimierung von Windrädern oder digitalen Crash-tests von Karosserien.

Eine weitere zentrale Frage der Batterieforschung ist, wie die Zellen altern. Und auch sie lässt sich mit Hilfe der mathematischen Modellierung angehen. Die sinkende Kapazität ist ein komplizierter Prozess, bei dem sich verschiedene Effekte gegenseitig beeinflussen. Um das zu untersuchen, nutzt man Experimente mit periodischen Lade- und Entladevorgängen (Zyklisierungsströme). Hierdurch lässt sich eine Anzahl N von Zyklen ableiten, die angibt, wie oft eine Batterie ge- und wieder entladen wurde. Dabei gilt es herauszufinden, wie die Grundkapazität Q^0 und die Spannung mit N abnehmen. Auch hier spielt die Stromstärke eine Rolle, weil etwa das schnelle

Laden und Entladen eines Akkus ganz andere Degradationseffekte hervorruft, als beim langsamen Zyklisieren auftreten.

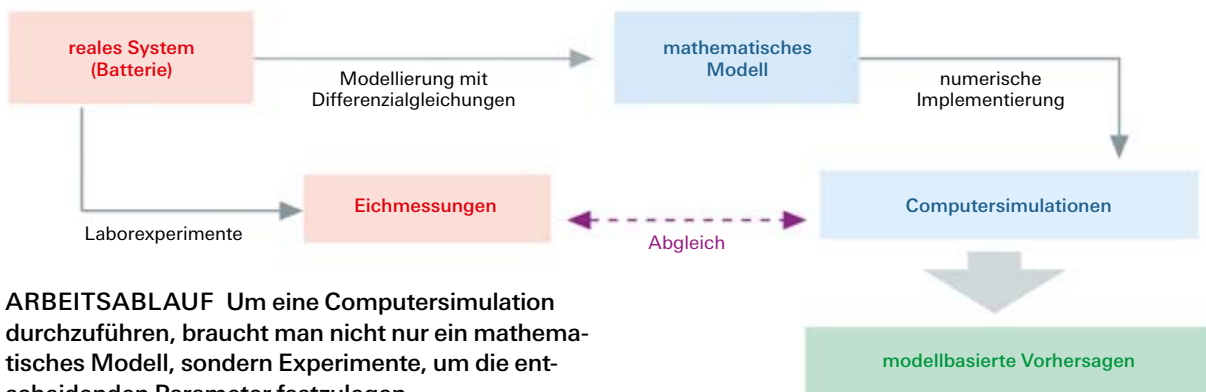
Zur mathematischen Beschreibung dient ein Modell, das von zwei Zeitskalen abhängt: Die kurze Skala t ist die eines Lade- und Entladevorgangs, welche die Größenordnung von Stunden hat; und die lange Zeitskala T ist die der Zyklenzahlen – die bei 1000 Zyklen mit einer C-Rate von 0,5 zirka 4000 Stunden oder 166 Tage beträgt. Damit wird klar, wie zeit- und kostenaufwändig Alterungsexperimente im Labor sind: Für eine einzige Zelle muss eine Messstation 166 Tage lang durchgehend belegt werden. Um eine statistische Aussage treffen zu können, untersucht man jedoch mehrere Zellen, zudem verschiedene C-Raten.

Die mathematische Modellierung kann helfen, die Laboruntersuchungen durch geeignete Simulationen zu reduzieren. Allerdings sind die Computersimulationen ebenfalls langwierig und teuer – wenn auch in geringerem Umfang als die Experimente. Man muss also wieder die Modelle vereinfachen. Dafür kann man einen ähnlichen Ansatz wählen wie bei der porösen Mikrostruktur: Durch eine periodische Homogenisierung ergeben sich partielle Differenzialgleichungen für den Lade- und Entladevorgang sowie für das Langzeitproblem, in dem die eigentlichen Degradationseffekte vorkommen. Wie sich diese Effekte auf die Batterie und deren Parameter $p = p(T)$ im Langzeitproblem auswirken, ist jedoch unklar.

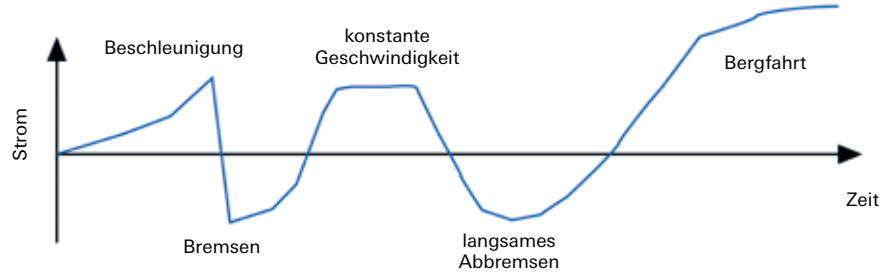
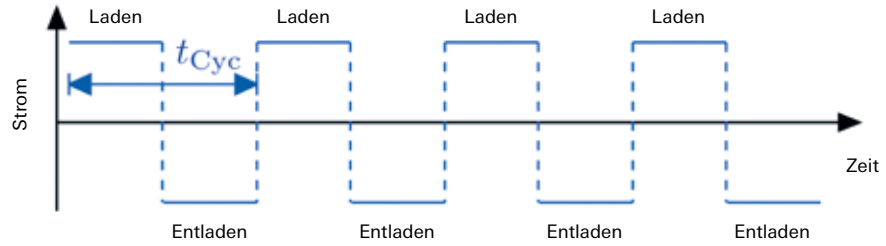
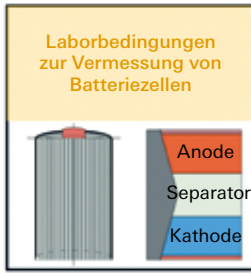
Neuronale Netze helfen, Alterungsprozesse in Batterien zu verstehen

Am Ende steht eine Differenzialgleichung $d/d_T p = f(p)$, allerdings ist die Funktion f , welche die Degradationseffekte abbildet, unbekannt. Eine Möglichkeit besteht darin, f durch möglichst wenig Messdaten zu bestimmen. Denn sobald die Funktion bekannt ist, kann man die obige Gleichung lösen und Vorhersagen über die Alterung der Batterie treffen.

Um f zumindest näherungsweise zu berechnen, gibt es zwei Methoden: Bei der ersten ist die grobe Struktur der Funktion bekannt, bei der zweiten nicht. Probleme der ersten Art lassen sich mit einer linearen Regression



ARBEITSABLAUF Um eine Computersimulation durchzuführen, braucht man nicht nur ein mathematisches Modell, sondern Experimente, um die entscheidenden Parameter festzulegen.



STROMPROFILE Die Laborbedingungen (oben) unterscheiden sich von realistischen Fahrscenarien in einem Elektrofahrzeug (unten).

angehen: Es gilt, die Messdaten durch eine Gerade zu beschreiben. Dafür wählt man für eine Geradengleichung $a \cdot x + b$ die Koeffizienten a und b so, dass der Abstand zu den Datenpunkten möglichst klein ist. Hierbei wird aber vorausgesetzt, dass die aufgezeichneten Messdaten entlang einer Geraden verlaufen.

Ist die grobe Verteilung der Datenpunkte jedoch nicht bekannt, müssen andere Ansätze weiterhelfen, zum Beispiel Methoden des maschinellen Lernens. Solche Techniken dienen etwa beim Verarbeiten handgeschriebener Ziffern dazu, Postleitzahlen auf Briefen abzulesen. Damit eine Maschine erkennen kann, ob es sich um eine Eins oder eine Sieben handelt, führt die lineare Regression nicht zum Ziel. Deshalb nutzt man künstliche neuronale Netze (KNN).

Diese ahmen den Aufbau des visuellen Kortex im Gehirn nach: Einzelne Rechenzellen (Neurone) sind in mehreren Schichten angeordnet und miteinander verbunden. Ein Eingangssignal wird von Neuronenschicht zu Neuronenschicht übertragen und dabei mit geeigneten Parametern multipliziert. Letztere müssen wie die Werte a und b bei der linearen Regression erst einmal bestimmt werden.

Das geschieht im Fall der neuronalen Netze durch ein »Training«: Für handschriftliche Zahlen gibt es beispielsweise Datensätze, bei denen etwa ein Bild einer »1« entspricht, ein anderes einer »4« und so weiter. Wird das Netzwerk mit diesen Daten trainiert, bekommt also die Daten immer wieder eingespeist, passt es die Parameter an. Am Ende des Trainings erhält das Netz weitere handgeschriebene Ziffern, aus denen es nun die abgebildete Zahl bestimmen kann.

Stehen wenig bis keine Informationen über die Struktur einer gesuchten Funktion f zur Verfügung, wie es bei der Batterieforschung häufig vorkommt, greift man daher auf künstliche neuronale Netze zurück, um f anzunähern. Die Trainingsdaten ergeben sich aus den Messungen der Zellspannung, abhängig vom Ladezustand und der Zyklenzahl.

Indem Fachleute Ansätze des maschinellen Lernens mit dem mathematischen Modell einer Batterie verbinden, hoffen sie, die Degradationseffekte und deren Auswirkung auf die Funktionsweise der Geräte bestimmen zu können. Hiermit ließe sich künftig am Computer einschätzen, wie lange sie haltbar sind. Durch dieses Verständnis könnten wir lernen, wie man die Stromspeicher langlebiger gestalten kann. ◀

QUELLEN

Heida, M. et al.: Homogenization of a porous intercalation electrode with phase separation, WIAS Preprint 2905 (2021)

Heida, M. et al.: Stochastic homogenization of Λ -convex gradient flows. Discrete and Continuous Dynamical Systems 14, 2021

Landstorfer, M.: A discussion of the cell voltage during discharge of an intercalation electrode for various c-rates based on non-equilibrium thermodynamics and numerical simulations. Journal of The Electrochemical Society 167, 2020

Landstorfer, M. et al.: Mesh generation for periodic 3D microstructure models and computation of effective properties. Journal of Computational Physics 431, 2021

Landstorfer, M. et al.: A modelling framework for efficient reduced order simulations of parametrised lithium-ion battery cells. European Journal of Applied Mathematics 26, 2022

Newman, J., Tiedemann, W.: Porous-electrode theory with battery applications. AIChE Journal 21, 1975

Träume einer Königin

Ein entscheidender Karriereschritt.

Eine Kurzgeschichte von Michael Groß

Himmel, bin ich froh, dass es vorbei ist! Vier Stunden Flug. Ich bin völlig fertig. Und dauernd die aufdringlichen Blicke der Männer. Ekelhaft. Der Start heute Mittag war ja recht gut. Bestes Wetter, warme Sonne küsste meine Haut ... Die ganze Stadt war auf den Beinen, ein unglaublicher Trubel draußen vor den Toren. Und wir stiegen und stiegen – egal. Ich bin heilfroh, es hinter mir zu haben.

Noch nie habe ich meine Stadt verlassen. Aber es musste sein. Ja, ich weiß, ich bin längst alt genug. Aber was wird mich draußen erwarten? Sie haben mich ja kaum vorbereitet auf die Fremde. Mein Kindermädchen meinte, ich solle doch froh sein, das Leben würde mich erwarten ... Das Leben! – Was weiß die denn. Immer nur zu Hause gewesen. Kaum je einen Fuß vor die Tür gesetzt.

Mir ist kalt. Das ist sicher die Anstrengung. Ich ziehe mich in einen Unterstand zurück, um wenigstens nicht von überall gleich gesehen zu werden. Ich muss meine Gedanken sammeln, mir überlegen, was ich tun will. Lastenträger und Arbeiter sind unterwegs, genauso geschäftig wie bei uns zu Hause. Noch kümmern sie sich nicht um mich, und ich hoffe sehr, dass das so bleibt! Wenigstens scheint es ein zivilisiertes Land zu sein, die Wege und Straßen hier sehen genauso sauber und gepflegt aus wie bei uns. Ja wirklich, gar nicht so anders.

Am nächsten Morgen drücke ich mich vorsichtig an eine Hauptstraße heran. Es ist laut, sie trampeln vorbei mit ihren Lasten. Ein erdrückendes Stimmengewirr, aber ich verstehe ihre Sprache nicht, das macht mir Angst. Tief atme ich die frische, würzige Luft ein. Ob ich mich daran gewöhnen werde? Meine Zukunft hängt davon ab, ob sie mich am Ende akzeptieren oder nicht.

Der Verkehr ist unglaublich. Ein schwer bepackter Träger rennt mich fast um. Ich beschwere mich lautstark, aber er reagiert gar nicht. Das macht mich wütend: Pass gefälligst auf, Kerl, hast du keine Augen im Kopf? Keine Reaktion. Ich bin so nahe, dass sie mich fast streifen. Ich habe hier nichts zu suchen, das weiß ich ganz genau. Wenn sie mich als Fremde erkennen, werden sie über mich herfallen. Das würde ich nicht überleben.

Ein aufgeblasener Polizist nähert sich, hochnäsiger, arrogant. Er kommt genau auf mich zu, bleibt stehen, baut sich vor mir auf. Er kommt mir so nahe, dass er mich fast berührt. Herrgott, wie ich das hasse! Er riecht aus dem Mund. Nun brummt er mürrisch ein paar Laute, die ich nicht verstehe. Aber nach einem skeptischen Blick geht er weiter. Sein Job ist es, die Arbeiter zu kontrollieren, und nicht, Fremde zu inspizieren. Wahrscheinlich war es nur

Neugier. Aber meine Knie zittern mir immer noch. Ein Wink von ihm, und ich wäre erledigt gewesen.

Es gelingt mir ab und zu, mich ein kleines Stück einzugliedern in den Strom der Arbeiter. Immer besser passe ich mich an. Ich kopiere ihre Bewegungen, ihre Hast, ihre aufgeregte Unstetigkeit. Ich schnappe Wortfetzen auf, versuche, den Sprachklang zu imitieren. Man soll mich nicht mehr als Fremde erkennen.

Jedes Mal, wenn es mir zu anstrengend oder zu gefährlich wird, springe ich zur Seite und schlage mich abseits. Im Großen und Ganzen aber klappt es ganz gut, ich kann mit mir zufrieden sein. Einen ganzen Tag lang treibe ich dieses Spiel. Dann, als ich mich sicher fühle, ziehe ich mutig mit ihnen fort.

So erreiche ich ihre Stadt. Sie ist größer als unsere, stößt mit ihren höchsten Gebäuden fast an den Himmel. Ihre ganze Ausdehnung kann ich gar nicht erfassen, aber ich spüre sofort: Das hier ist altes Land, seit Äonen besiedelt. Hier herrscht Ordnung und Betriebsamkeit, das gefällt mir!

Mittlerweile belästigt mich niemand mehr. Ich habe mich gut angepasst. Dennoch halten die Wachen am Tor mich an. Ich tue unterwürfig, bedeute ihnen durch Gesten, dass ich stumm bin. Gründlich tasten sie mich ab. Ich lasse es zu, sie scheinen sich einen Spaß daraus zu machen. Endlich sind sie fertig und lassen mich durch. – Ich bin drin! Eine unbekannte Stadt, lauter Fremde, aber sie nehmen keine Notiz von mir. Die unverschämte Übergriffigkeit der Wächter regt mich immer noch auf! Aber das Wichtigste ist: Ich bin drin.

Ich nehme eine Kleinigkeit zu mir. Seit Tagen habe ich nichts gegessen, so aufgereggt war ich. Nun senkt sich Abendkühle über die Stadt. Es fühlt sich an wie bei uns zu Hause. Zeit, ein paar Stunden zu schlafen. Ich bin völlig erschöpft von den anstrengenden Tagen, die ich ungeschützt im Freien verbracht habe. Auch sitzt mir der Flug noch immer in den Gliedern. Ich bin da wohl sehr an meine Grenzen gegangen. Ich schlafe so tief, dass ich nicht einmal träume.

Als ich mir die Augen reibe, herrscht heller Tag. Die Stadt ist längst auf den Beinen: Händler, Arbeiter, Sklaven, Aufseher, Wasserträger, Soldaten, Fremde ... das ganze Spektrum. Meine Erinnerung an zu Hause verblasst allmählich, vermischt sich mit den fremden Gerüchen und Geräuschen dieser Stadt. Doch, ich könnte mir gut vorstellen, hier zu leben. Alles läuft geordnet ab, aber nicht hektisch. Das ist ein gutes Zeichen, es zeugt von Selbst-

bewusstsein. Junge Mädchen führen die Kleinen aus, bringen sie in die Wärme der Sonne. Ob sie wohl auch mich bedienen würden? Ich könnte sie zwingen, wenn ich wollte; sie sind kleiner als ich.

Aber zuerst habe ich noch etwas zu erledigen. Etwas, von dem alles abhängt. Ich mache es wirklich nicht gerne, aber es muss sein. Ich könnte es morgen tun oder in einer Woche ... Es macht keinen Unterschied. Am besten, ich erledige es gleich. Bevor sie mich doch noch als Fremde enttarnen und töten. Denn es gibt nur einen sicheren Platz in der ganzen Stadt.

Dazu muss ich in ihren Kern vordringen, in ihre heiligsten, innersten Hallen. Ich brauche nur den Frauen zu folgen, die all die Köstlichkeiten transportieren. Ich weiß, dass sie sie zu ihr bringen. Immer tiefer geht es hinab, warme Gänge, gut gepflegt, angelegt in uralter Zeit. Hier ist der Bereich der Vorräte: große, gut gefüllte Kammern. Dort wohnen die Kleinsten mit ihren Ammen. Und schließlich öffnet sich der Korridor zu einer riesigen Halle. Fackeln brennen an den Wänden. Und dort sitzt sie. Die Königin.

Sie ist wahrhaft gewaltig, mindestens fünfmal so groß wie ich. Und das will wirklich was heißen! Ihr Hofstaat umschwirrt sie, zahllose Frauen füttern sie, putzen sie, streicheln sie, tanzen und singen für sie. Sie selbst frisst immerzu die leckersten Happen. Ein eindringlicher Duft erfüllt den Raum; er ist so betörend, dass er mir fast die Sinne raubt.

Meine Anwesenheit scheint die Dienerinnen noch hektischer anzutreiben, sie umsorgen die Königin immer intensiver. Aber ich sehe auch, wie alt sie ist. Sie ist schwach, sie zittert. Unaufhörlich produziert sie Nachkommen. Kindermädchen bringen sie sofort in die angrenzenden Stuben und pflegen sie rührend. Seit ich gekommen bin, überschlagen sie sich fast in ihrer Hast. Aber ich will, dass sie das mit meinen Kindern machen.

Ich trete näher. Die Königin wendet den Kopf und blickt mich traurig an. Ein ganzes, langes Leben voller Pflichterfüllung spiegelt sich in ihren Augen. Der Hofstaat drückt sich schreiend an die Wand, zwei, drei Dienerinnen zerfetze ich mit meinen Kiefern. Dann baue ich mich vor der Königin auf, die mich um Haupteshöhe überragt. Blut tropft von meinen Waffen. Ich sehe, sie ist zu alt, um zu kämpfen. Sie weint. Ihre Fühler zittern, berühren mich. Ich verneige mich tief und lange vor ihr. Und dann fahren meine Kiefer mit einer einzigen, raschen Bewegung durch ihren Hals. Ihr Kopf poltert zu Boden. Ihre Beine zucken,

ihre Brust bebt. Ihr Hinterleib legt noch immer Eier. In wenigen Minuten wird sie tot sein. Ich warte mit gesenktem Haupt, bis ihr sterbender Leib sich beruhigt hat.

Ich habe einen Mord begangen. Einen Königsmord!

Aber nun gehört der Thronsaal mir. Nächstes Jahr, wenn die Sonne wieder auf die Stadt scheint, werden nur noch wenige Arbeiterinnen der alten Garde da sein. Das Jungvolk aber, das die Stadt bevölkern, den Staat dann führen wird, wird aus meinem Leib gekommen sein. Sie werden meine Kinder sein.

Ein so starker Staat wie dieser wird mich gut versorgen, dessen bin ich gewiss. Und ich werde trotz meiner Bluttat eine gute Königin sein. Hunderttausende von Arbeiterinnen werde ich produzieren, Tag für Tag, Stunde um Stunde. Und eines Tages, wer weiß, werde ich einer jungen Prinzessin das Leben schenken. Unerfahren, hübsch, naiv ... Wenn sie auch so ehrgeizig ist wie ich, vielleicht wird sie dann mich töten.

Aber eines ist sicher: Sie wird sich – wie ich vor drei Tagen – auf ihren Hochzeitsflug begeben. Vier wunderbare, gläserne Flügel werden ihr gewachsen sein, zwei große und zwei kleinere. Jubelnd wird sie aufsteigen, den silbernen Klang ihrer Flügel im Ohr, höher und höher, dem Licht entgegen. Und nur die stärksten Männer der Stadt werden ihr folgen können, eingehüllt in ihren königlichen Duft. Den schönsten und stärksten von allen wird sie schließlich erwählen, hoch oben in der Luft. Und das ganze Wunder wird beginnen an einem milden Tag im hellen Sommer, wenn die ganze Stadt auf den Beinen ist, weil uns alle die Sonne küsst ...

Eine Ewigkeit muss ich so gestanden haben, versunken in Erinnerungen. Diese drei Tage werden mich mein Leben lang begleiten – die Träume einer Königin.

Leises Flüstern am Eingang des Thronsaals weckt mich aus meinen Gedanken. Die ersten Sklavinnen trauen sich wieder herein. Es sind Kinder der alten Königin, Früchte ihrer eigenen Hochzeit. Sie stehen dicht gedrängt, sie bringen Essen. Ich schaue sie lange an, dann nicke ich ein wenig.

Schüchtern treten sie näher. ◀

DER AUTOR

Michael Groß ist studierter Biologe und Biochemiker und hat an der Universität Göttingen gearbeitet. Daneben ist er schon seit Langem als Autor tätig.



ZFORD / BETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ein neues Konzept der Zeit

Vergangenheit und Zukunft sind in der Quantenmechanik eng miteinander verknüpft. Indem man das ändert, könnte man die Quantenphysik mit dem expandierenden Universum in Einklang bringen.

Ökologie der Angst

Fast alle Tiere – sogar große Raubkatzen – fürchten den Menschen. Dieses Verhalten hat weit reichende ökologische Folgen.



UC SANTA CRUZ, PUMA PROJECT FEEDING STUDY

ZEISS/NE / BETTY IMAGES / ISTOCK



Was ist die wahre Ursache?

Ob der Klimawandel für eine Hitzewelle oder Überflutung verantwortlich ist, lässt sich immer besser untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, womit die betroffene Region künftig rechnen muss und wie sie sich am besten vorbereitet.

NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER CONCEPTUAL IMAGE LAB



Lieferdienst aus dem All

Im September bringt eine Raumsonde Proben von einem Asteroiden auf die Erde.

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

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

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

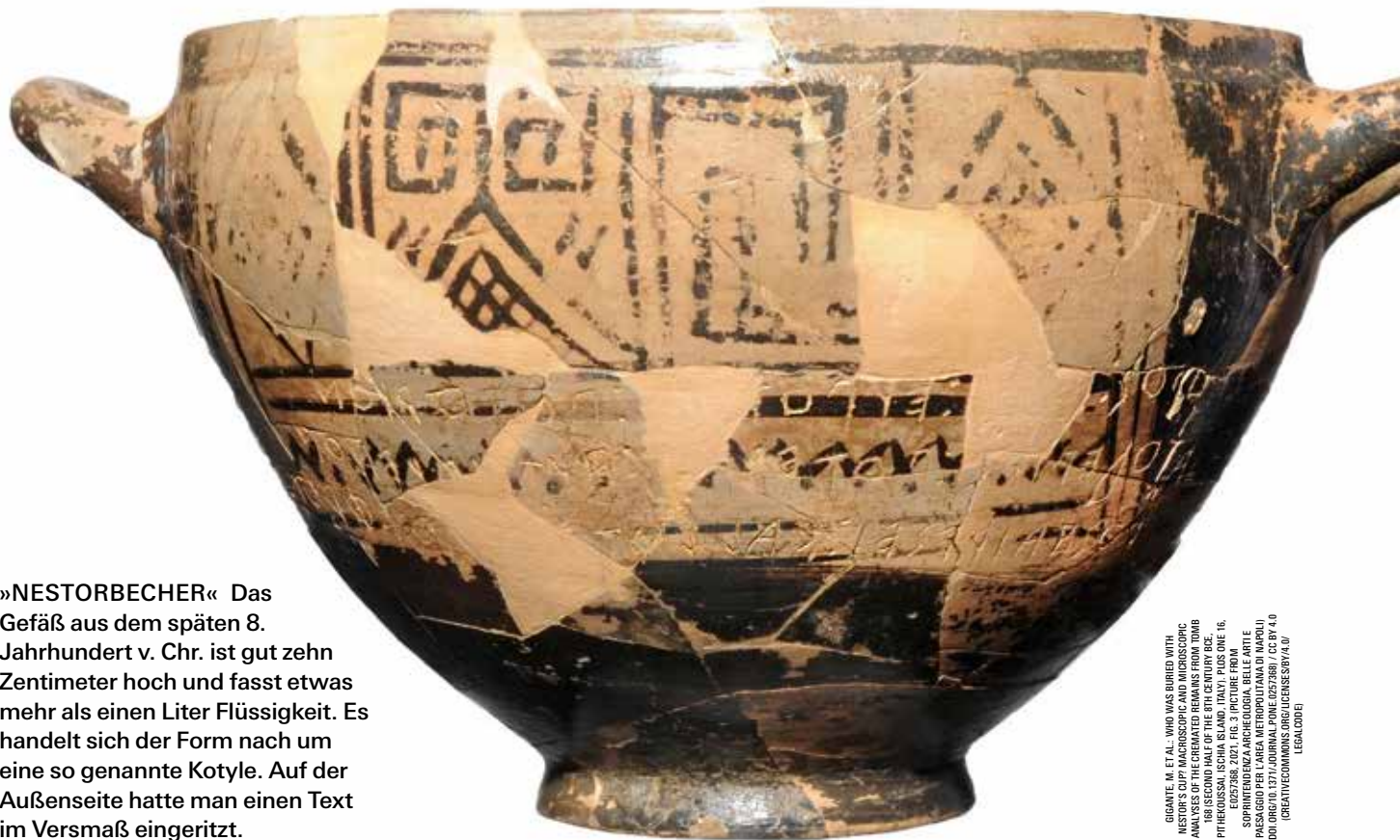
ARCHÄOLOGIE

Das Rätsel um den Nestorbecher

In dem frühgriechischen Grab eines Jungen entdeckten Archäologen ein Trinkgefäß – und darauf eine Inschrift, die auf Wein, Liebeslust und »Ilias« anspielt. Wie Toter und Text zusammenpassen, war lange ein Rätsel. Nun haben Fachleute eine Erklärung für den Fund von der Insel Ischia. Dabei half eine selten verwendete Analyse­methode.



Klaus-Dieter Linsmeier ist Archäologiejournalist im Raum Heidelberg. Er war Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



»NESTORBECHER« Das Gefäß aus dem späten 8. Jahrhundert v. Chr. ist gut zehn Zentimeter hoch und fasst etwas mehr als einen Liter Flüssigkeit. Es handelt sich der Form nach um eine so genannte Kotyle. Auf der Außenseite hatte man einen Text im Versmaß eingeritzt.

GIANNI M. ET AL., WHO WAS BURIED WITH NESTOR'S CUP? MACROSCOPIC AND MICROSCOPIC ANALYSES OF THE CREMATED REMAINS FROM TOMB 168 (SECOND HALF OF THE 8TH CENTURY BCE, PITHECUSAN, ISCHIA ISLAND, ITALY), PLUS ONE 16, E025288, 2024, FIG. 3 (PICTURE FROM SUPPLEMENTARY MATERIALS) AND THE PASTASOPOPERI CARIA METROPOLITANAI (MAROU) (DOI:10.1371/JOURNAL.PONE.0257988) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSE/BBY/4.0) LEGALCODE

▶ Mit seinen Sandstränden und heißen Quellen ist Ischia ein touristisches Highlight im Golf von Neapel. Wohl weniger die Sonne und Erholung lockten vor rund 2800 Jahren Griechen auf die Insel: Sie suchten Eisenerz, den Werkstoff einer neuen Zeit. Dafür kamen sie von der rund 1000 Kilometer entfernten Insel Euböa nach Pithekoussai, wie sie ihre neue Heimat nannten. Es war die erste griechische Koloniegründung im westlichen Mittelmeerraum.

Als Archäologen dort in den 1950er Jahren zu graben begannen, erforschten sie vor allem die Nekropole. Inzwischen widmen sie sich auch der Siedlung und einem alten Bekannten: dem »Nestorbecher« von Pithekoussai aus der zweiten Hälfte des 8. Jahrhunderts v. Chr.

Der tönernerne Trinkbecher fand sich 1954 im Grab mit der Fundnummer 168, in dem laut der Untersuchung der Knochen ein maximal 14-jähriger Junge begraben lag. Bald nach der Entdeckung erregte der Behälter viel Aufmerksamkeit in der Archäologengemeinde. In die Wandung war einst ein Gedicht geritzt worden, das die Mythenfigur Nestor nennt und auf den Sagenkreis um Troja hinweist. Deshalb galt das Gefäß lange als Zeitmarke für die Entstehung von Homers »Ilias«: Das Epos musste offenbar zum Zeitpunkt der Becherfertigung bekannt gewesen sein. Über die Bedeutung der Zeilen, die von Trunkenheit und Lust handeln, diskutieren Experten seit Langem (siehe Kasten »Rätselhafte Zeilen von Homer?«).

Wie passen Grab und Beigabe zusammen? Ein Kind, bestattet mit einem Trinkbecher, der auf Wein und Liebe anspielt – kann das sein? Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler um die Bioarchäologin Melania Gigante

LEICHENBRAND Diese Funde aus Grab 168 von Pithekoussai haben Fachleute als menschliche Knochen und Zähne identifiziert. Ebenso kam Knochenmaterial von Tieren zum Vorschein.

AUF EINEN BLICK

Spurensuche im Leichenbrand

- 1** 1954 fand sich in einem antiken Grab auf der italienischen Insel Ischia ein Trinkbehälter. Die Ausgräber nannten ihn auf Grund einer Inschrift auf dem Gefäß »Nestorbecher«.
- 2** Damals interpretierten Anthropologen die Aschenreste im Grab als Leichenbrand eines 10- bis 14-jährigen Jungen. Doch jüngst kamen Forscherinnen und Forscher zu einem ganz anderen Ergebnis.
- 3** Dazu analysierten sie die Feinstruktur der noch erhaltenen Knochenfragmente – ein Verfahren, das in der Archäologie bislang wenig gebräuchlich ist.

von der Universität Padua und die Anthropologin Alessia Nava von der University of Kent haben daher die Überreste des feuerbestatteten Toten mit neuen Methoden untersucht. Ihres Erachtens lässt sich die bisherige Deutung des Grabs wohl nicht mehr aufrechterhalten.

Was über Pithekoussai bekannt ist

Der italienische Archäologe Giorgio Buchner (1914–2005) widmete Pithekoussai sein Leben. Dank seiner Forschungen ist heute viel über die antike Insel bekannt, etwa dass Griechen dort mit Phöniziern und Einheimischen zusammenlebten. In der Literatur der Antike spielte der Ort



GIGANTE, M. ET AL. WHO WAS BURIED WITH NESTOR'S CUP? MICROSCOPIC AND MACROSCOPIC ANALYSES OF THE CRACKLED REMAINS FROM TRIBE 118 (SECOND HALF OF THE 8TH CENTURY B.C., PITHEKOUSSAI, ISCHIA ISLAND, ITALY). PLUS ONE ETC. CREATIVE COMMONS BY/NC/ND/4.0 (CC BY 4.0) (CREATIVECOMMONS.ORG/licenses/by/nc/nd/4.0/)

hingegen keine sonderlich große Rolle. Der Geograf Strabon (zirka 63 v. Chr.–23 n. Chr.) erwähnte die Insel fast 700 Jahre nach der Koloniegründung, er nannte Eretria und Chalkis auf Euböa als Heimatstädte der Siedler. Dafür fand Buchner tatsächlich Hinweise in Form von euböischer Keramik.

Mehr als 1300 Gräber hat der Archäologe dokumentiert, darunter Körper- und Brandbestattungen. Für Erstere hatte man einst einen Graben ausgehoben und darin den Sarg oder eine große Amphore mit dem Leichnam versenkt. Andere Tote wurden auf einem Scheiterhaufen verbrannt, die Überreste anschließend unter Feldsteinhügeln bestattet.

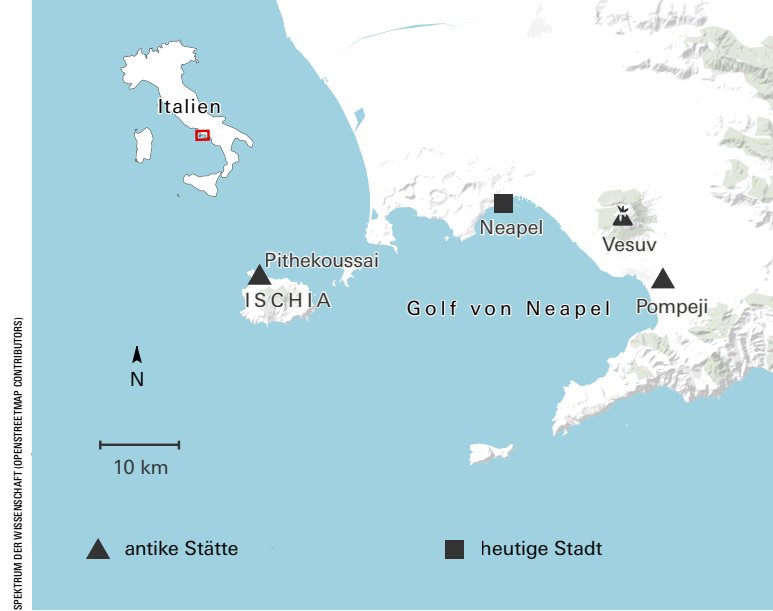
Buchner beschrieb Grab 168 als ein großes Oval dunkler Erde, typisch für eine Brandbestattung, etwa vier Meter lang und zwei Meter breit. Im Erdreich verteilt lagen verbrannte Knochenreste. Bei den Grabungen kamen auch zahlreiche Gefäßfragmente zu Tage, darunter Teile des »Nestorbechers«. Am Grund des Ovals fand Buchner dann drei Gruben, die er als drei weitere Gräber deutete.

Die Anthropologen Marshall Joseph Becker von der West Chester University und T. F. Spence von der University of Birmingham untersuchten den geborgenen Leichenbrand. Ihres Erachtens gehörte er zu einem Knaben von 10 bis 14 Jahren. Buchner folgerte daraus: Es waren doch nicht drei Gräber, sondern nur eines, das für ein Kind auffällig reich ausgestattet war. Die drei Vertiefungen mussten also später entstanden sein.

Die Knochen aus dem Grab zeigen typische Brandspuren

Die Forschergruppe um Gigante und Nava hat 2021 den Leichenbrand erneut begutachtet. Sie zählten 195 Knochenfragmente, manche kleiner als ein Zentimeter. Alle zeigten die typischen Folgen des Feuers wie Risse oder das Ablösen von Schichten. Aufschlussreich war auch die Farbe: Nur 15 Prozent der Stücke waren schwarz verkohlt, der Rest weiß oder grau. Die helle Färbung entsteht durch das Mineral Hydroxylapatit, das dem Knochen Härte verleiht und gut 40 Prozent seiner Masse ausmacht. Es bleibt zurück, wenn die organischen Verbindungen bei sehr hohen Temperaturen aufgebrochen werden und der Kohlenstoff als Kohlendioxid oder -monoxid entweicht.

Für seine Analyse griff das Team auf Studien von Forschern zurück, die Anfang des 21. Jahrhunderts experimentell untersucht haben, wie Körper und Skelette verbrennen. So wirkt das Feuer eines Scheiterhaufens vor allem von unten auf einen Leichnam ein; das Brennmaterial und Wind sorgen ebenfalls für eine ungleiche Temperaturverteilung. Wasser- und fetthaltiges Gewebe schützt zudem die Knochen eine Weile gegen die Hitze. Auf Grundlage all dieser Daten schätzten die Forscher die Verbrennungstemperatur im Nestorgrab auf 600 bis 900 Grad Celsius. Das bedeutete jedoch: Erbsubstanz lässt sich aus den Knochenstücken nicht mehr extrahieren. Ob Becker und Spence mit ihrem Befund damals richtiglagen, mussten Gigante und Co also anders prüfen.



INSEL IN BESTLAGE Im 8. Jahrhundert v. Chr. gründeten Kolonisten von der griechischen Insel Euböa eine Siedlung auf Ischia. Sie nannten den Ort Pithekoussai.

Obwohl die Fragmente von der Hitze stark beschädigt wurden, ließen sie sich anhand ihrer Form in drei Kategorien unterteilen: eindeutig menschlich, eindeutig tierisch und unklar. Die Archäozoologin Kerstin Pasda vom Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Erlangen-Nürnberg erklärt das Verfahren: »Man muss das [Knochen-] Stück in die Hand nehmen und im Licht drehen, um einen räumlichen Eindruck zu erhalten.« Anschließend vergleicht man den Knochen mit den Exemplaren in einer Beispielsammlung, sagt die Forscherin. »Mitunter ist es bloß eine Biegung an einer bestimmten Stelle, die für eine Spezies typisch ist.« Wobei verbrannte und daher verformte Gebeine besonders schwer zu beurteilen seien – »insgesamt erfordert dieser Prozess sehr viel Erfahrung«. Dass Becker und Spence die tierischen Knochen nicht erkannten, wundert Pasda aber nicht. Erst in den 1980er und 1990er Jahren haben Fachleute ihre Kenntnisse über Leichenbrand stark erweitert.

Bei seiner Auswertung stellte das italienische Team jedenfalls fest: 45 Fragmente sind tierisch. Sie stammen recht sicher von einem Schaf oder einer Ziege, einem Hund und von Vögeln. Wie der Zustand der Knochen verrät, dürften die Tiere oder Teile davon beim Totenritual auf dem Scheiterhaufen verbrannt sein. Solche kultischen Opfer haben Gigante und ihr Team bei mehr als 45 Prozent der Gräber von Pithekoussai für die Zeit um 700 v. Chr. nachgewiesen. Zudem stellten sie fest: Während in Pithekoussai Ziegenknochen auch in Frauengräbern zu Tage kamen, waren Hunde wohl auf die Bestattungen von Männern beschränkt. Demnach könnte der Tote von Grab 168 männlich gewesen sein.

Die menschlichen Knochen aus der Grablege umfassen 130 Fragmente, allerdings fehlen bestimmte Skelettpartien: der Gesichtsschädel, die Hände, Füße und der Brustkorb. Erhalten sind die übrigen Teile des Schädels, die Knochen der Extremitäten sowie wenige Fragmente der Wirbelsäule und des Beckens.

Das Gewicht des Leichenbrands war mit 166 Gramm auffällig gering. Das kremierte Skelett einer Frau wiegt normalerweise etwa 1,5 bis 2,2 Kilogramm, das eines Mannes zirka 2 bis 3,2 Kilogramm. Doch die Überreste aus zeitgleichen Gräbern von Pithekoussai sind ebenfalls deutlich leichter – im Durchschnitt zirka 150 Gramm bei Frauen und etwa 250 Gramm bei Männern. Offenbar klaubte man für die Beisetzung nur bestimmte Knochen aus dem Scheiterhaufen.

Weil die Gebeine verbrannt waren, konnten Gigante und Nava auch das Sterbealter nicht mit Hilfe der klassischen Forensikmethoden eingrenzen. Einzig ein Stück Oberkiefer lieferte einen klaren Hinweis: Eine Naht im Gaumenbereich war vollständig geschlossen – der Knochen stammte also von einem Erwachsenen. War der Tote demnach gar kein Kind gewesen?

In den vergangenen Jahren haben Fachleute ihr Spektrum an Methoden deutlich erweitert – unter anderem zur Mikrostruktur der Knochen, aus der sich Sterbealter und Spezies ablesen lassen. Eine der wenigen Deutschen auf diesem Gebiet ist Julia Gresky, Paläopathologin im Referat Naturwissenschaften an der Zentrale des Deutschen Archäologischen Instituts in Berlin. Sie erklärt: »Insbesondere die kompakte Rinde der Langknochen bei erwachsenen Menschen hat einen ganz charakteristischen Aufbau.« Es geht dabei um Lamellenknochen. In ihrer Rinde verlaufen Osteone, die auch Haverssysteme heißen. Der Durchmesser eines Osteons beträgt etwa 0,2 Millimeter. Es besteht aus ungefähr 5 bis 20 Lamellen, die einen Haverskanal mit Blutgefäßen und Nerven ummanteln. Die Lamellen setzen sich teils aus organischen Stoffen wie Kollagenfasern zusammen und teils

Rätselfhafte Zeilen von Homer?

»Nestors Becher [bin ich – oder: gab es mal], aus dem sich gut trinken lässt. Wer aber aus diesem Becher trinkt, den wird sogleich Verlangen, [die Gabe] der schön bekränzten Aphrodite, ergreifen.«

Nur drei Zeilen umfasst die Inschrift auf dem Trinkgefäß, das als »Nestorbecher« von Ischia bekannt ist. Es handelt sich um eines der frühesten Beispiele der griechischen Alphabetschrift. Stilistischen Merkmalen zufolge kam das Gefäß als Importstück von der Insel Rhodos nach Pithekoussai. Experten datieren ihn ans Ende des 8. Jahrhunderts v. Chr.

Die von den Klassischen Philologen Klaus Rüter und Kjeld Matthiessen 1968 publizierte Übersetzung legt nahe, dass die Verse unterschiedlich interpretiert werden können. Das liegt auch daran, dass Gefäß und Text nicht vollständig erhalten sind. Spielen die Zeilen aber tatsächlich auf die »Ilias« an und liefern ein Entstehungsdatum für das Epos?

Eher nicht. Homers »Ilias« beruht auf jahrhundertalten, mündlich überlieferten Liedern. Nach heutigem Wissen war es die

erste schriftliche Fassung der Dichtung zum Trojanischen Krieg, noch dazu eine sehr umfangreiche und kunstfertige. Welcher Quelle genau sich der Besitzer des Bechers bediente, ist daher unklar. Zudem zitiert die Inschrift keinen Text direkt, der aus der Frühzeit des antiken Griechenlands bekannt ist.

Was in der »Ilias« vom Gefäß des mythischen Nestors überliefert ist, hilft ebenfalls nur wenig weiter. Homer erwähnt den Becher in wenigen Zeilen, die viel Raum für Interpretationen lassen:

»Dazu den überaus schönen Becher, den von zu Hause mitgebracht der Alte, mit goldenen Nägeln beschlagen; und Henkel hatte er vier; und zwei [goldene] Tauben pickten auf beiden Seiten eines jeden; und zwei Standbeine waren darunter. Jeder andere bewegte ihn mit Mühe vom Tisch, wenn er voll war, Nestor aber, der Alte, hob ihn ohne Mühe.«

So übersetzte der Tübinger Altphilologe Wolfgang Schade-waldt die Verse Mitte des 20. Jahrhunderts. Schon in der Antike rangen Gelehrte um die Bedeutung: Offenbar ging es bei dem

Becher nicht um ein Trinkgefäß, sondern um einen Krater, also einen großen Behälter zum Mischen von Wein, Wasser und anderen Zutaten. Warum aber taten sich junge Krieger vom Schlage eines Achill oder Aias schwer damit, ihn vom Tisch zu heben, nicht hingegen der greise Nestor? Verwendete Homer das Gefäß vielleicht als Symbol für dessen legendäre Trinkfestigkeit? War das Kräfteressen nur eine Metapher für: Wenn alle anderen längst lallten, brachte Nestor seine Ideen ein und setzte sie mühelos durch?

Was heißt das für den Trinkbehälter von Ischia? Da die erste Zeile in einem anderen Versmaß verfasst wurde als die beiden folgenden, sollte der Anfang vielleicht tatsächlich auf die »Ilias« oder eine andere Dichtung aus dem Troja-Kontext anspielen. Die beiden anderen Zeilen beziehen sich dagegen konkret auf den Tonbecher. Und der sei offenbar besser als Nestors mythisches Gefäß, denn er verspricht nicht nur Trinkfestigkeit, sondern auch eine aphrodisierende Wirkung.

aus anorganischen Substanzen, vor allem aus dem genannten Hydroxylapatit.

Diese Feinstruktur entwickelt sich beim Heranwachsen. Das Skelett eines Kinds sowie das nach Brüchen neu gebildete Knochengewebe besteht aus so genannten Geflechtknochen – die Bestandteile sind darin uneinheitlich angeordnet. Mit Älterwerden bilden sich dann Osteonen, die die Gebeine stabiler machen.

Tierknochen enthalten ebenfalls Osteonen, doch sind sie meist lockerer gepackt als beim Menschen. Hinzu kommen Lamellen ohne klare Faserausrichtung oder Knochen ohne Gefäßversorgung. Gibt es dennoch eindeutige Unterscheidungsmerkmale zwischen Menschen- und Tierknochen? »Letztlich findet man verschiedene Knochentypen auch im menschlichen Skelett«, meint Gresky. »Geflechtknochen gibt es etwa dort, wo Sehnen ansetzen, und in Teilen der Schädelbasis.« Mit der entsprechenden Expertise könne allerdings eine genaue Zuweisung gelingen.

Dreierlei Analysen für die Gebeinfragmente

Wenn Fachleute Knochen untersuchen, fertigen sie Dünnschliffe an. Sie trennen dazu feine Scheiben von den Knochen ab und schleifen sie glatt, um anschließend die Struktur im Mikroskop beurteilen zu können. Damit keine Fehler unterlaufen, gilt es laut Gresky eines zu beachten: »Um Mensch und Tier anhand von Dünnschliffen voneinander zu trennen, sollten Proben aus korrespondierenden [Knochen-]Regionen entnommen werden.«

Genau das haben Gigante und Nava getan. Für die Dünnschnitte von menschlichen Knochen wählten sie ausschließlich Fragmente von Oberschenkel und Oberarm. Die Proben zeigten unter dem Mikroskop durchgängig die Osteonenstruktur von Erwachsenen. Ebenso gingen die Forscherinnen bei den Dünnschliffen der Tierknochen vor. Hier erkannten sie unter dem Mikroskop typisch tierische Geflechtknochen und Haverssysteme.

Nach dieser qualitativen Analyse erfolgte an den menschlichen und tierischen Dünnschnitten eine quantitative Untersuchung. Zunächst ermittelte die Arbeitsgruppe den Flächenanteil der Osteonen und Haverskanäle und verglich ihn mit Referenzwerten. Das Ergebnis: Bis auf wenige Ausnahmen hatte man die Knochenstücke richtig als Mensch oder Tier identifiziert.

An den Schnitten ermittelten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler abschließend die Zahl der Osteonen pro Fläche – der Wert nimmt mit dem Alter zu. Und so stellten Gigante und Nava fest: Die Proben stammen von drei unterschiedlich alten Individuen.

Mit dieser Methode lässt sich auch das Sterbealter abschätzen. Doch genaue Vergleichswerte liegen bisher nur für unverbrannte Knochen vor. Die Forscher vermuten aber, dass es sich bei den drei Toten um Erwachsene gehandelt hatte – Kinder waren es jedenfalls ganz sicher nicht. So viel lässt sich aus der Osteonenzahl per Fläche ablesen. Buchner hatte anfangs also richtiggelegen, dass an der Stelle von Grab 168 drei Verstorbene verbrannt und bestattet worden waren.

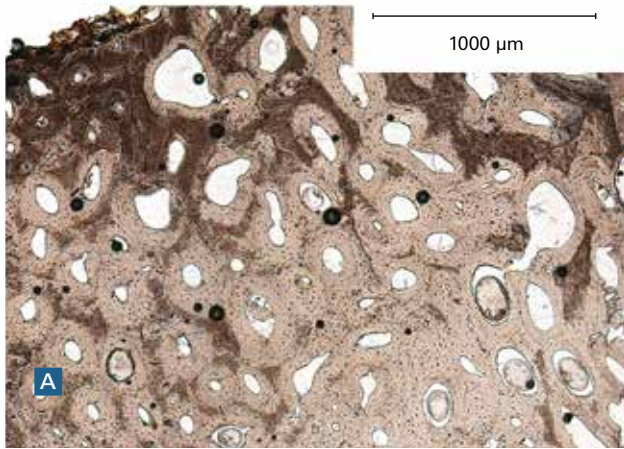


THE METROPOLITAN MUSEUM OF ART, NEW YORK / ROGERS FUND, 1914
(WWW.METMUSEUM.ORG/ART/COLLECTION/SEARCH/Z68941 / CCB 1.0 CREATIVE COMMONS ORG/PUBLICDOMAIN/ZERO1.0LEGALCODE)

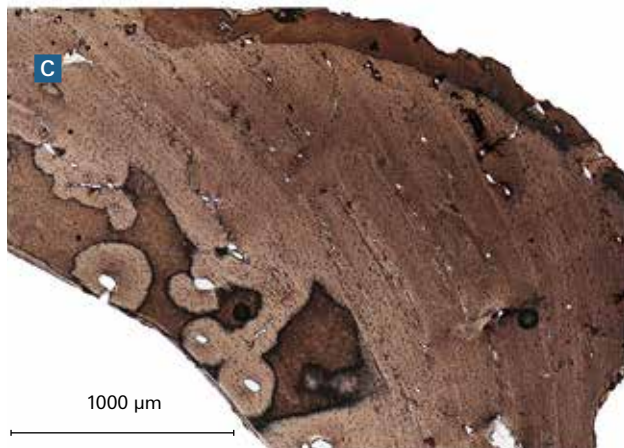
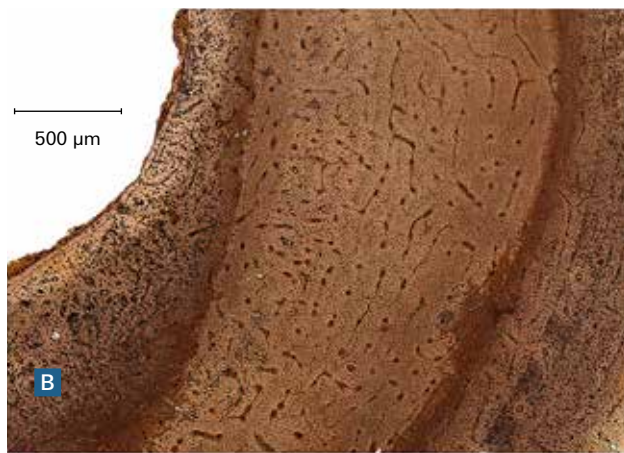
KRATER Das mehr als einen Meter hohe Gefäß stand im 8. Jahrhundert v. Chr. auf einem Grab. Die Form entspricht einem Krater, einem Weinmischgefäß. Darauf sind Szenen von Grabfeierlichkeiten abgebildet: Der aufgebahrte Tote ist umgeben von Trauernden, darunter verläuft eine Prozession von Kriegern und Streitwagen.

Der »Nestorbecher« von Pithekoussai galt demnach keinem Kind. Die Zeilen, die von Trunkenheit und Liebeslust handeln, waren offenbar auf erwachsene Menschen gemünzt. Doch selbst nach der speziellen Knochenanalyse sind nicht alle Experten überzeugt. Die Frage lautet: Lag der Becher wirklich als Beigabe im Grab?

Buchner berichtete von einem komplexen Neben- und Übereinander mehrerer Körper- und Brandgräber. Zudem: Wie der Archäologe Erich Kistler von der Universität Innsbruck anmerkt, stammen die Scherben des »Nestorbechers« aus der ovalen Schicht, die sich zwischen mehreren Grabhügeln erstreckte. Darin lagen viele Bruchstücke von Gefäßen, die für Trinkgelage bestimmt waren. Laut Kistler bezeugen sie ein Opferfest bei der Bestattung. Dabei sei es Teil des Rituals gewesen, dass man das verwendete Geschirr zerschlug und verbrannte, ergänzt die Homerexpertin Barbara Patzek. »Wir finden bei Homer entsprechende Schilderungen von den Beisetzungen gefallener Helden«, erklärt Patzek. Vermutlich ging so der »Nestorbecher« zu Bruch.



FEINE UNTERSCHIEDE Im Mikroskop lassen sich die verschiedenen Knochenstrukturen erkennen: Die Probe **A** stammt von einem menschlichen Knochen aus dem Grab 168 von Pithekoussai, **B** und **C** gehörten zu Tieren.



GIGANTE, M. ET AL.: WHO WAS BURIED WITH NESTOR'S CUP? MACROSCOPIC AND MICROSCOPIC ANALYSES OF THE CREMATED REMAINS FROM TOMB 168 (SECOND HALF OF THE 8TH CENTURY BCE, PITHEKOUSSAI, ISCHIA ISLAND, ITALY). PLOS ONE 16, E0257868, 2021, FIG. 7 (DOI:10.1371/JOURNAL.PONE.0257868) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENCE/SBY4.0/LEGALCODE)

Jenes Gefäß, die Toten, das Grabritual – wie hing alles zusammen? Erich Kistler richtet dazu den Blick auf die Hinterbliebenen. Seines Erachtens galt das Tongeschirr nicht allein den Toten, sondern es stellte auch den Status der Familie zur Schau. Die Botschaft des »Nestorbechers« an die Trauergemeinschaft lautete dann: Der oder die Toten entstammen einem Haushalt, in dem Männer beim Wein zusammensitzen und Verse rezitieren. Und die Dichtkunst zu kennen, war damals Ausweis für hohe Bildung und Zugehörigkeit zu einer vornehmen Familie. ◀

QUELLEN

Becker, M.J.: Human skeletal remains from the pre-colonial Greek emporium of Pithekoussai on Ischia. In: Christie N. (Hg.): Settlement and economy in Italy, 1500 BC to AD 1500. Oxbow Books, 1995

Buchner, G., Ridgway, D.: Pithekoussai I. La necropoli: tombe 1–723 scavate dal 1952 al 1961. Bretschneider 1993

Gigante, M. et al.: Who was buried with Nestor's Cup? Macroscopic and microscopic analyses of the cremated remains from Tomb 168 (second half of the 8th century BCE, Pithekoussai, Ischia Island, Italy). PlosOne 2021

Wie sich Gurken gen Himmel schrauben

Ranken suchen mit kreisenden Bewegungen nach Stützgelegenheiten und umschlingen sie. Anschließend verdrillen und verkürzen sie sich und ziehen so den Rest der Pflanze empor. Durch ein raffiniertes Design des Zellverbunds spielen hier mehrere physikalische Effekte zusammen.

»Wir mußten annehmen: es walte in der Vegetation eine allgemeine Spiraltendenz«

Johann Wolfgang von Goethe

Als ich vor Jahren vom Urlaub zurückkam, staunte ich über dicke Kürbisse im Apfelbaum. Eine der Kürbispflanzen hatte sich offenbar auf den Weg gemacht, ihre schattige Ecke im Garten zugunsten eines Platzes an der Sonne einzutauschen. Ich rätselte lange, wie dies innerhalb einiger Wochen geschehen konnte. Dabei blieb ich vor allem an der Frage hängen, wie es die Pflanze geschafft hat, auf den Apfelbaum zu klettern.

Inzwischen weiß ich, dass es der Kürbis ähnlich anstellt wie die Gurke. An deren Beispiel wiederum ist die Erforschung des Aufstiegs rankender Pflanzen besonders weit gediehen.

Die meisten anderen Gewächse sind ausreichend stabil, um sich eigenständig aufrecht zu halten. Im Gegensatz dazu sind die Gurke ebenso wie der Kürbis und weitere Arten auf externe Stützen angewiesen, an denen

sie sich dem Licht entgegen ziehen. Dazu bilden sie Ranken aus, die durch charakteristische Suchbewegungen solche Haltemöglichkeiten ausfindig machen und an ihnen andocken.

Bei der Gurke – wie auch bei zahlreichen sonstigen Pflanzen – können sie sich nur in der Richtung ihrer Unterseite krümmen. Dort sind sie zudem für Reize empfänglich, um im Berührungsfall festzumachen. Für die Suche nach einer passenden Gelegenheit muss sich die Ranke zum Einen autonom bewegen können und zum Anderen Aktivitäten auslösen, die dann zur Fixierung führen.

Eine junge Ranke ist zunächst eingerollt und streckt sich anschließend in die Länge. Sofort nach Kontakt mit einer möglichen Stütze wird diese von der Ranke umgriffen. Die Reibungskraft wächst exponentiell mit dem



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

KÜRBISSE AN BAMBUSPERGOLA
Kletterfreudige Kürbisgewächse streben in erstaunliche Höhen, ob an Bäumen oder künstlichen Rankhilfen.



Winkel der Umschlingung. Da jede vollständige Windung mit 360 Grad beiträgt, verbindet sich die Pflanze schnell sehr fest. Eine ähnliche Reibungssteigerung gibt es beispielsweise beim Festmachen von Booten: Nach nur wenigen Würfen um einen Poller kann ein einzelner Mensch ein Schiff mit seiner Muskelkraft halten.



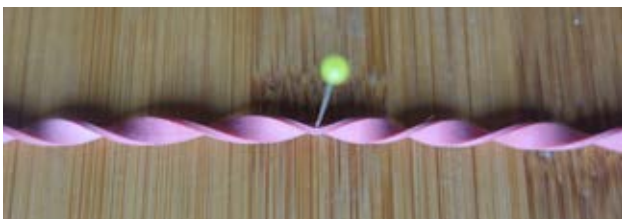
H. JOACHIM SCHLICHTING

JUNGER GURKENTRIEB Anfangs sind die Ranken noch spiralförmig eingerollt.

UMSCHLUNGENE STÜTZE Die Ranke lässt eine einmal gefundene Verbindung nicht mehr los und festigt sie, indem sie sich verschraubt. Das führt zwangsläufig zu einer Umkehr der Drehrichtung.



H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING

KEHRTWENDE Bei einem manuell verdrillten, auf einem Frühstücksbrettchen fixierten Gummiband ändert sich der Drehsinn.

Am freien Ende der Ranke setzt sich die Krümmungsbewegung so lange fort, bis die Schlinge insgesamt fest anliegt. Auch an den bis dahin geraden Abschnitten entstehen weitere schraubenförmige Windungen, bis alles straff ist. Die dadurch bewirkte Zugkraft ist so groß, dass sogar die Pflanze selbst ein Stück hochgezogen wird, gegebenenfalls mitsamt der inzwischen gewachsenen Früchte.

Bei genauer Betrachtung der Rankenschraube entdeckt man etwa auf halbem Weg einen Umkehrpunkt im Windungssinn. Das ist reine Notwendigkeit, wie sich mit einem Freihandexperiment leicht demonstrieren lässt. Dazu spannt man ein flaches Gummiband über ein passendes Brett. Anschließend dreht man auf der einen Hälfte mit den Fingern Windungen in das Band. Man kann es nicht verhindern, dass auf der anderen Seite die gleiche Anzahl mit entgegengesetzter Drehrichtung entsteht. Dazwischen liegt dann ein neutrales Stück. Lässt man das auf diese Weise unter Spannung gesetzte Gummi los, so schnell es in die glatte Ausgangssituation zurück. Bei den Gurkenranken sind die Windungen jedoch irreversibel, weil mit der Verdrillung bleibende physiologische Veränderungen stattfinden.

Wie es zu alledem kommt, konnte erst 2012 eine Forschungsgruppe an der Harvard University in Cambridge klären. Sie wies nach, dass die Spiralbildung keinen aktiven Kraftakt darstellt, sondern letztlich auf eine passive asymmetrische Kontraktion von Zellen zurückgeht. Der Prozess setzt ein, sobald die Ranke sich an der gefundenen Stütze festgeschlungen hat. Von da an bestimmt das Verhalten eines feinen Faserbands das weitere Geschehen. Es durchzieht die Ranke von einem Ende zum anderen. Mikroskopische Aufnahmen zeigen: Das Band verholzt an einer Seite, indem die Zellen Wasser an ihre Nachbarn abgeben. Die halbseitige Schrumpfung führt insgesamt zu einer entsprechenden Krümmung, die sich dem umgebenden weichen Gewebe aufzwingt. Dadurch entsteht Spannung, die zusammen mit der Fixierung der Ranke an ihren Enden zur Verdrillung führt.

Im Gegensatz zu alltäglichen Schraubenfedern werden die Ranken beim Auseinanderziehen nicht einfach nur länger, sondern zusätzlich bringen sie weitere Windungen auf beiden Seiten des neutralen Mittelstücks hervor. Auch diese ungewöhnliche Dynamik liegt an der unterschiedlichen Festigkeit der Zellen innerhalb des Faserbands. Das Harvard-Team baute im Labor mit Hilfe verklebter Silikon-schichten ein Band mit einem ähnlich exotischen elastischen Verhalten nach. Vielleicht findet sich irgendwann eine passende technische Anwendung dafür. Bis dahin bleibt das Prinzip der Kürbisgewächse eine Kuriosität der Natur. ◀

QUELLE

Gerbode, S. J. et al.: How the cucumber tendril coils and overwinds. *Science* 337, 2012

Die Mathematik der Literatur

Die übermittelten Emotionen in Büchern oder die Satzstruktur klassischer Romane verlaufen häufig nach den gleichen Mustern.

Text: Mark Fischetti

Ein gutes Buch ruft beim Lesen eine Vielzahl von Emotionen hervor. Tatsächlich vermitteln fast alle Romane und Dramen nur eines von sechs »emotionalen Erlebnissen«: etwa das ansteigende Glücksgefühl, das bei William Shakespeares »Win-

termärchen« aufkommt, oder die anfängliche Euphorie und anschließende Katastrophe bei »Romeo und Julia«. Forscher von der University of Vermont haben die Wörter, die Freude oder Trauer vermitteln, in mehr als 1300 Büchern grafisch dargestellt, um den Verlauf der vermittelten Emotionen in den Werken aufzuzeigen. Überraschenderweise fanden sie dabei recht wenig Variation.

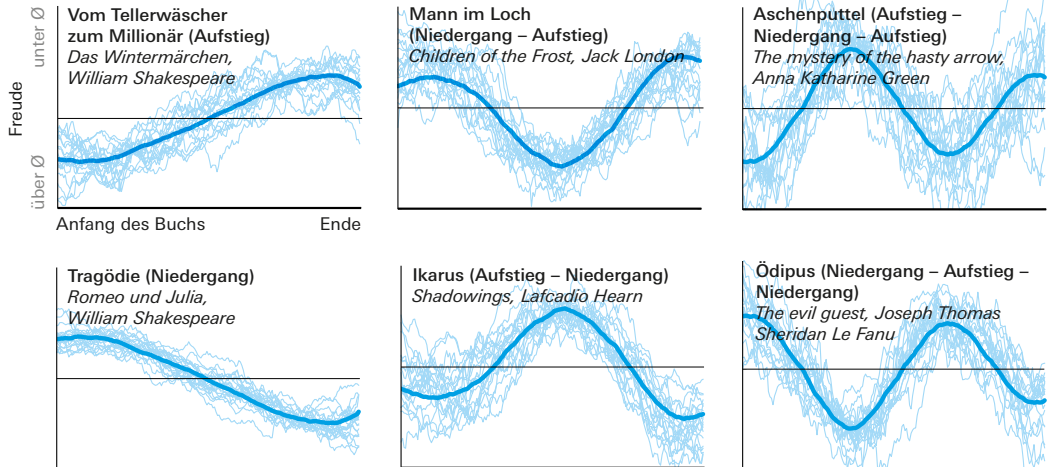
Eine polnische Studie hat sich hingegen den Satzlängen in verschiedenen Werken gewidmet und häufig fraktale Muster ausgemacht. Dabei handelt es sich um Strukturen, die

sich in kleinem und großem Maßstab wiederholen: Wenn man ein ganzes Buch betrachtet, ähnelt die Variation der Satzlängen jener innerhalb eines einzelnen Kapitels.

Der Hauptautor der erstgenannten Studie Andrew J. Reagan hält es für wichtig, literarische Werke mit mathematischen Methoden zu untersuchen. Durch die Unmengen von Daten, die das Humangenomprojekt generiert hat, hätten wir viel über Gene gelernt, erläutert er. »Vielleicht können uns die literaturwissenschaftlichen Daten auch mehr über die Geschichten beibringen.«

Emotionaler Spannungsbogen

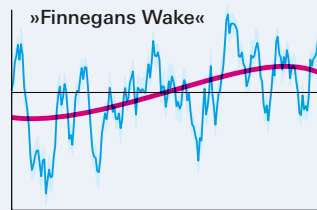
Etwa 85 Prozent der 1327 fiktiven Geschichten aus dem »Project Gutenberg« (eine freie digitale Bibliothek) folgen einem von sechs verschiedenen emotionalen Verläufen (dunkelblau). Die Kurven ergeben sich durch Wörter des Texts, die entweder Freude oder Trauer transportieren (hellblau). Alle untersuchten Bücher waren englischsprachig und enthielten weniger als 100.000 Wörter. Hier sind einige Beispiele:



ANDREW J. REAGAN, NACH REAGAN, A. J. ET AL.: THE EMOTIONAL ARCS OF STORIES ARE DOMINATED BY SIX BASIC SHAPES. EPJ DATA SCIENCES, 2016, FIG. 4 (DOI: 10.1146/EPJDS1388B-016-0053-1) / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2017, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Querverbindung

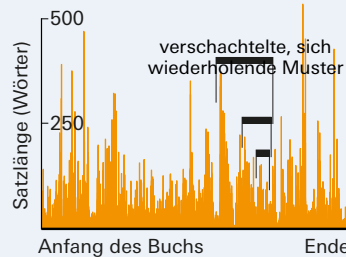
Die Forscherinnen und Forscher haben sich ebenfalls die emotionalen Verläufe zu »Finnegans Wake« und »Die Wellen« angesehen. Auch diese beiden Werke folgen je einem der sechs zuvor gezeigten emotionalen Spannungsbögen (fette Kurve). Ob Bücher derselben Kategorie ähnliche fraktale Satzstrukturen aufweisen, ist bisher nicht geklärt.



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2017, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Fraktaler Satzbau

Der Satzaufbau und die Satzlänge in 113 berühmten literarischen Werken verschiedener Sprachen weisen fast immer fraktale Muster auf. Bücher mit der Erzähltechnik des Bewusstseinsstroms, wie »Finnegans Wake« von James Joyce, enthalten extrem viele wiederholende Satzelemente, im Gegensatz zu Werken wie »Die Wellen« von Virginia Woolf. Trotz dieser Unterschiede haben beide Bücher fraktale Satzstrukturen.



JEN CHRISTIANSEN, NACH DRZOZ, & ET AL.: QUANTIFYING ORIGIN AND CHARACTER OF LONG-RANGE CORRELATIONS IN NARRATIVE TEXTS. EPJ DATA SCIENCES, 2015, FIG. 10 (DOI: 10.1146/EPJDS1388B-015-0023-1) / SCIENTIFIC AMERICAN FEBRUAR 2017, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Wann wird es menschliches Gehirn aus der Petrischale geben?

Ehemaliger CERN-Forscher liefert Sciencefiction und Wissenschaftsthiller in einem.

► Nach ein paar Seiten denkt man, der Inhalt des Werkes von Patrick Illinger wäre Stoff für eine Netflixserie mit spannenden Cliffhangern, die ein verregnetes Wochenende versüßt, doch in kürzester Zeit vereinnahmt der gedruckte Inhalt ebenso. Schon das Zitat aus Mary Shelleys Frankenstein zu Beginn lässt vermuten, worum es geht: Was anfangs nach einem spektakulären Flugzeugabsturz aussieht, der von einer toughen, mehrfach ausgezeichneten Journalistin untersucht wird, entpuppt sich als eine internationale Verstrickung verschiedenster Player, die vereint sind durch das hehre Ziel, menschliches Hirngewebe zu erschaffen. Viel mehr sollte man bei diesem Wissenschaftsthiller fast nicht vorwegnehmen.

Durch die bildgewaltige Erzählung springt man mit den Protagonisten durch die verschiedenen Kulissen der

Szenen, ist nach wenigen Seiten von der Handlung in den Bann gezogen und sieht alles vor den eigenen Augen ablaufen. Die Reise der Journalistin Livia Chang führt von Atlanta, der Absturzstelle, quer durch die USA, über Honduras, wo wilde Banden wüten, und über das offene Meer nach Italien, wo ein Treffen der Präsidenten der Großmächte stattfinden soll, um nur einige ihrer Stationen zu nennen. Die kurzweiligen Episoden von verschiedenen Schauplätzen des Geschehens weltweit leuchten diese wie ein Suchscheinwerfer aus, ob es sich um die unappetitlich zugerichteten Opfer der Bandenkriminalität oder das Trümmerfeld der Absturzstelle des Flugzeugs handelt. Der Spannungsbogen wird stetig fester gespannt, wie beispielsweise mit der Frage, warum eine Gartenarbeiterin, die den ganz in ihrer Nähe stattfindenden Absturz



Patrick Illinger

Cortex

Piper, München 2023

€ 18,-

fast unbeschadet überstanden hat, psychiatrisch behandelt werden muss. Welche Rolle spielen dabei Oktopusse? Und warum reagieren die Tiere auf einige Menschen derart aggressiv? Unmöglich, nicht wissen zu wollen, wie sich diese Fäden zusammenspinnen und wer oder was dahintersteckt.

All diese Fragen will die kluge Protagonistin Livia Chang aufklären, die sich zielstrebig und mit dem Mut bis Leichtsinns einer nach der Wirklichkeit Suchenden durchbeißt und ganz nebenbei Kampfgeist wie Lucy Liu in Tarantinos »Kill Bill« an den Tag

legt. Ohne diese Fähigkeiten, ihre umfassenden Sprachkenntnisse sowie einen Verbündeten, der tiefen Einblick sowohl in die Aktivitäten geheimer Labore als auch in ihr Seelenleben hat, wäre die Mission vielleicht gescheitert. Doch ob sie gelungen ist, liegt am Ende im Auge des Betrachters und ist eine Frage der Perspektive: Geht es um die Lebenswelt von Livia oder um nichts weniger als die Zukunft der Menschheit?

Zwischen den Zeilen des Thrillers ist stets zu lesen, dass der Autor selbst Forscher und lange Jahre für das Ressort Wissen bei der SZ ver-

antwortlich war, denn Zukunftsszenarien bedürfen neben Fantasie auch eines großen Wissensfundaments. Nur wenn Sciencefiction durch den Bezug zur realen Wissenschaft einen Möglichkeitsraum eröffnet, vermag sie so zu fesseln, dass es unmöglich ist, das Buch zur Seite zu legen. So hat sich die anfängliche Skepsis der Rezensentin, die Sachbuchfan ist, schnell in ein Lesefieber verwandelt.

Elisabeth Stachura ist promovierte Soziologin und Wissenschaftsjournalistin in Bremen.

Von uns und der Welt

Allerlei Interessantes und Spannendes, mehr oder weniger Relevantes aus der Welt der Wissenschaft im Plauderton erzählt.

► Einen reißerischen Titel hat das englische Autorenduo gewählt. Doch die offenkundigen Übertreibungen machen sofort klar, dass es hier nicht um eine ernst gemeinte Neuauflage der Bücher »Bildung« von Dietrich Schwanitz oder »Die andere Bildung« von Ernst Peter Fischer geht. Aber um was dann? Erst wenn man den Klappentext zu Rate zieht, wird klar: Es handelt sich um einen Streifzug durch die Naturwissenschaften. Das Leben auf der Erde, Galaxien und Außerirdische, Mathematik und unser eigener Geist stehen auf der Agenda. Warum also nicht – lassen wir uns von allerlei Interessantem aus der Welt der Wissenschaft in neun Kapiteln unterhalten.

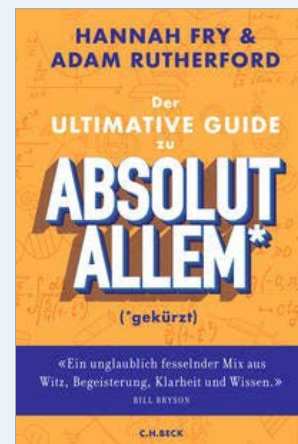
Das erste Kapitel nähert sich dem Konzept der Unendlichkeit anhand der Bibliothek von Babel, die schlichtweg alle möglichen Buchstabenkombinationen aufbewahrt – und so auch alles mögliche Wissen der Welt. Leider findet sich natürlich auch die viel größere Menge an denkbaren Unwahrheiten in dieser Bibliothek. Weiter geht es in Kapitel zwei mit der Entwicklung des Lebens und welchen physikalischen Einschränkun-

gen Leben unterliegt. Auch die berühmte Beobachtung, dass Floh, Elefant und alle anderen Landlebewesen ungefähr gleich hoch springen können, wird erklärt. Das dritte Kapitel widmet sich Kugeln – etwa der Erde oder auch dem Satellitenexperiment Gravity Probe B, dessen (beinahe) perfekte Kugelsensoren die Verdrehung der Raumzeit durch die tägliche Erdrotation nachgewiesen haben. Kapitel vier und fünf widmen sich den Methoden zur Altersbestimmung und dem Phänomen Zeit.

»Haben wir einen freien Willen?« ist die Leitfrage des sechsten Kapitels – ein klassisches Thema der Philosophie also, das heute in manchen Aspekten auch naturwissenschaftlich angegangen wird, wie etwa mit dem bekannten Experiment, das zeigen konnte, dass Menschen ihre Entscheidungen früher treffen, als ihnen bewusst ist. Kapitel sieben handelt von Parawissenschaften und Aberglauben, und Kapitel acht fragt: »Liebt mich mein Hund?« Eine wilde Mischung bis hierhin also. Gesteigert wird sie noch durch Kapitel neun, in dem die Autoren wohl einfach alles niedergeschrieben

haben, was ihnen sonst noch eingefallen ist.

Den Eindruck, dass die Themen etwas wahllos sind, hat man jedoch bereits zuvor. Als Leser fühlt man sich eher wie in einem Newsfeed auf sozialen Medien, wo ein halbwegs cleverer Algorithmus einem einen interessanten Post nach dem anderen präsentieren will. Das kommt der



Adam Rutherford, Hannah Fry

Der ultimative Guide zu absolut Allem*

C.H. Beck, München 2023

€ 23,-

Unterhaltsamkeit zugute, aber hinterlässt das Gefühl der Beliebigkeit. Die Qualität der einzelnen Kapitel variiert deutlich. So sind die ersten drei Kapitel sehr lesenswert, informativ und unterhaltsam zugleich. Das Kapitel über die Liebe des Hundes hingegen plätschert nur vor sich hin, und am Ende bestätigt sich, was man zu Beginn schon befürchtet hat: Es ist nicht möglich, eine fundierte Aussage zu der Frage zu treffen. Stattdessen präsentieren die Autoren zwei kurze Aufsätze, in denen sie ihre

gegenteiligen Meinungen darlegen.

Nicht nur die an soziale Medien erinnernde Struktur zeigt, dass Fry und Rutherford versuchen, eine junge Leserschaft anzusprechen. Oft klingt der Text betont, wenn nicht gar bemüht cool – beispielsweise eröffnen die beiden ihr Buch mit einem ziemlich flachen Witz: »Machen Sie doch einmal beim Lesen die Augen zu.« Womöglich ist auch etwas Sprachwitz beim Übersetzen aus dem Englischen verloren gegangen. Und die Autoren scheuen sich nicht,

an eher unüblich vielen Stellen einen Bezug zum Thema Sex herzustellen.

Wen diese insgesamt etwas anstrengende Lässigkeit nicht stört, kann sich zumindest in der vorderen Hälfte des Buches auf ein paar schöne Stunden Wissenschaft freuen.

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

Mathematik – kein einfaches Spiel

Anspruchsvoll, aber unterhaltsam: ein Überblick über die Mathematik und das Verhältnis zur Physik und zu den Geisteswissenschaften.

► Gordon Gillespie hat Mathematik und Physik studiert und in Philosophie promoviert. In diesen drei Disziplinen nimmt er uns mit auf eine Reise, die man wohl nur dann so richtig schätzen kann, wenn man in allen drei Fächern (mindestens) solide Schulkenntnisse besitzt.

Aber der Verfasser versucht – wie er im Vorwort schreibt – »das Unmögliche, nämlich [in die Tiefe] zu bohren und Sie trotzdem nicht verlieren«. Und er möchte den Graben zwischen den »zwei Kulturen«, den Geistes- und Sozialwissenschaften auf der einen und den Natur- und Technikwissenschaften auf der anderen Seite, überwinden helfen. Er verzichtet weitgehend auf mathematische Formeln und Herleitungen, da »die Vermittlung möglichst leichtfüßig voranschreiten« soll. Das »Leichtfüßige« gelingt ihm ganz hervorragend, sein Stil ist gefällig, seine Formulierungen immer wieder einmal salopp, verleiten ab und zu zum Schmunzeln, die zahlreichen Vergleiche und überraschenden Metaphern machen den Text interessant und abwechslungsreich. Seine Lösung des Problems einer gendgerechten Sprache liest sich sehr angenehm: Dem »Mathematiker« (als generisches Maskulinum) stellt er kurz

darauf die »Physikerin« (als generisches Femininum) zur Seite.

Der Buchtitel »Das Orakel der Zahlen« trifft den Inhalt nicht so ganz. Nur das erste Kapitel ist diesen gewidmet – allerdings geht der Verfasser auch hier schon auf Aspekte ein, die über das rein Mathematische hinausgehen und den Untertitel »Philosophie der Mathematik« rechtfertigen. Vor den Zahlen schon gab es das Zählen, wie er in einer fiktiven Zeitreise in die Steinzeit am Beispiel einer Sippe von Jägern und Sammlern demonstriert. Dem Zählen liegt als Schlüssel zum Verständnis die Eins-zu-eins-Beziehung zwischen Mengen zugrunde. So haben Menschen (und nicht der »liebe Gott«, wie Leopold Kronecker meinte) die natürlichen Zahlen als »durch ihre funktionale Rolle im Rahmen des Zählens bestimmte Abstrakta« geschaffen. Den Zahlen sei die Anwendbarkeit »gewissermaßen in die Wiege gelegt«, so der Autor, ihr »Verallgemeinerungspotenzial« bis hin zur modernen abstrakten Algebra sei erstaunlich, aber kein Wunder.

Wichtige Erkenntnis im nächsten Kapitel über Geometrie: Die »alten« Griechen als Urväter dieser Disziplin haben diese weitgehend ohne Zahlen betrieben (was laut Gillespie sicher

auch damit zu erklären ist, dass sie kein praktikables Zahlensystem hatten). Das zeigt sich unter anderem deutlich an dem Problem der »Quadratur des Kreises«: Nur Zirkel und Lineal (und dieses ohne Zahlenmarkierungen!) waren erlaubt, um aus einem Kreis ein Quadrat mit gleichem Flächeninhalt zu konstruieren. Dann aber hat gerade die Geometrie zur »Schockgeburt« der irrationalen Zahlen geführt, die von Hippasos, einem Schüler des Pythagoras, entdeckt worden sind (nämlich die Wurzel aus zwei als Länge der Diagonalen im Quadrat mit Seitenlänge eins). Die Existenz irrationaler Zahlen erschütterte zwar das Weltbild der Pythagoreer, aber da sich diese Zahlen später gut auf dem Zahlenstrahl einfügen ließen und man mit ihnen auch auf gleiche Weise rechnen konnte, wurden sie schließlich akzeptiert. Eine völlig neue Geometrie ergab sich nach Auffassung von Gillespie durch das von Descartes im 17. Jahrhundert eingeführte Koordinatensystem. Diese »Vereinigung von Geometrie und Algebra« bewertet er als »einen der wichtigsten Meilensteine in der gesamten Wissenschaftsgeschichte«.

Der nächste Abschnitt stellt das Thema Unendlichkeit in den Mittel-

punkt. Ausgehend von Zenons berühmtem Paradoxon von Achill und der Schildkröte werden ausführlich die Argumente für das potenziell und das aktual Unendliche diskutiert. Der Verfasser begründet, warum sich Aristoteles' Argumentation gegen das aktual Unendliche durchgesetzt hat und über fast zwei Jahrtausende dank dessen Autorität die vorherrschende Lehrmeinung war. Trotzdem konnten Leibniz und Newton die Differenzialrechnung entwickeln, in der sie doch undefinierte unendlich kleine Größen verwendeten. Erst im 19. Jahrhundert schufen Cauchy und Bolzano mit der exakten Definition des Grenzwerts eine sichere Grundlage dafür, wie man das Problem des aktual Unendlichen umgehen konnte. Überraschend kommt dann die anfangs vom Autor schon als so wichtig erachtete Eins-zu-eins-Beziehung wieder mit voller Macht zu Wort: Cantor erschafft mit seinen Untersuchungen das aktual Unendliche und so »ein komplexes Reich unendlich vieler Formen des Unendlichen«. Die mit dem Begriff »Menge« bald darauf auftretende »Grundlagenkrise der Mathematik«, ausgelöst durch Bertrand Russells berühmte Antinomie, wird ebenfalls beschrieben und analysiert.

Nach den »Fundamenten der Mathematik« betrachtet Gillespie in der zweiten Buchhälfte das Verhältnis der Mathematik zu der Physik und zu den Geisteswissenschaften.

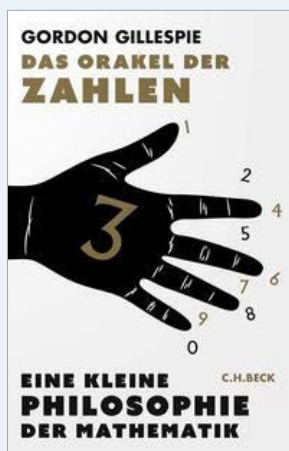
Ausführlich behandelt er die Geometrie der speziellen Relativitätstheorie. Er beginnt mit dem »Zwillingsparadoxon« und nutzt in seiner Argumentation durchweg das von Albert Einstein selbst mehrfach verwendete Beispiel des geradeaus verlaufenden Bahndamms und des vorüber rasenden Zuges. Dadurch kann er die Raumzeit auf eine Raumdimension beschränken und die »Weltlinien« in einem zweidimensionalen Länge-Zeit-Koordinatensystem anschaulich darstellen. Anhand vieler

dieser so genannten Minkowski-Diagramme erklärt Gillespie den Begriff eines Inertialsystems und daraus folgernd die Phänomene der Zeitdilatation und Längenkontraktion. Er verlangt seinen Leserinnen in diesem Abschnitt ein hohes Abstraktionsvermögen in der Geometrie und solide Kenntnisse auch in der Physik ab. Auch wenn er der Ansicht ist, dass die spezielle Relativitätstheorie nur eine Frage der Geometrie ist, dürften doch Begriffe wie Inertialsystem, Galilei- und Lorentz-Transformationen

an anderer Stelle die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie skeptisch sieht und eher der (mir nicht bekannten) Alternative der »de-Broglie-Bohm'schen Mechanik« zuneigt.

Die Frage, wie die »enorme Nützlichkeit der Mathematik für Naturwissenschaft und Technik zu verstehen ist«, nimmt ebenfalls breiten Raum ein. Folgerichtig widerspricht er scharf der Auffassung von Mathematik als Spiel, die sie vor allem als eine Wissenschaft sieht, in der ausgehend von Axiomen nach formalen Regeln (unabhängig von irgendeiner Realität) abstrakte logische Folgerungen gezogen werden. Dabei denkt er an Hilbert, wenn der in seinen »Grundlagen der Geometrie« den berühmt gewordenen Satz formuliert, nach dem »Punkte«, »Geraden« und »Ebenen« auch durch »Tische«, »Stühle« und »Bierseidel« ersetzt werden könnten. Auch das immer wieder geäußerte Erstaunen darüber, wie wunderbar die Mathematik die Naturerscheinungen beschreiben kann, ist für ihn nicht nachvollziehbar. »Die Anwendbarkeit der Mathematik [...] in unserer Welt ist vielmehr von vornherein in ihr angelegt.« »Nicht der Zusammenhang zwischen Mathematik und Welt ist erstaunlich. Das eigentlich Erstaunliche verbirgt sich vielmehr weit innerhalb der Grenzen des mathematischen Reichs selbst.« Das macht er zum Beispiel an dem Weg der Kugel in einem Galton-Brett deutlich: Diesen kann man als eine 0-1-Folge darstellen und darauf die Binomialverteilung anwenden – dass man dann aber überraschenderweise mit der eulerschen Zahl e zur Normalverteilung kommen kann, sei nicht in der Natur angelegt, sondern eine grandiose innermathematische Entdeckung.

Abschließend setzt sich Gillespie mit dem Verhältnis zwischen der Mathematik und den Geistes- und Sozialwissenschaften auseinander. Ausgehend von einigen Beispielen aus der Wahrscheinlichkeitstheorie – »eine Theorie rationaler Entscheidungsfindung unter unvollständigem Wissen« – diskutiert er Beispiele aus Medizin, Volkswirtschaftslehre, Politik, Jura, Geschichtswissenschaft



Gordon Gillespie
Das Orakel der Zahlen
 C.H. Beck, München 2023
 € 26,-

oder Eigenzeit vielen Lesern unbekannt sein. Seine im Vorwort geäußerte Aussage, »den allermeisten Ausführungen werden Sie auch dann folgen können, wenn »Mathe nie Ihr Ding« gewesen ist«, halte ich für sehr optimistisch. Da die Physik »nicht so ganz mein Ding« ist, kann ich nur versuchen, den sehr klaren Erläuterungen und Schlüssen zu folgen. Ich muss aber dann seinen Aussagen vertrauen, wenn er andere Darstellungen oder Aussagen von Physikern (bis hin zu einer Koryphäe wie Richard Feynman) sehr kritisch bewertet und in Frage stellt. Oder wenn er

und Philosophie und stellt fest, dass hier mathematische Kenntnisse sehr hilfreich gewesen wären. Er will »keineswegs einer unkritischen Mathematisierung [...] das Wort reden«, aber »insbesondere die Fähigkeit, sinnvolle von unsinnigen mathematischen Modellbildungen unterscheiden und die Grenzen jener

bemessen zu können« sei wichtig.

Der Autor hat ein sehr anspruchsvolles Werk geschrieben. Wer sich darauf einlassen will, braucht Zeit und intensives Mitdenken, wird sicher auch manche Passagen zwei- oder dreimal lesen müssen – aber es lohnt sich: Die Auseinandersetzung führt, um noch einmal aus dem

Vorwort zu zitieren, »zur produktiven Hinterfragung und Bereicherung der eigenen Sicht- und Denkweise«.

Hartmut Weber war Mathematiklehrer in Kassel und rezensiert regelmäßig für die Deutsche Mathematiker-Vereinigung.

Mikrochips – immer kleiner, immer unverzichtbarer

Unsere Gesellschaft ist abhängig von Mikrochips. Chris Miller erzählt deren Geschichte, die sich oft liest wie ein Wirtschaftskrimi.

► Beinahe im Monatsrhythmus verschlechtern sich aktuell die Beziehungen zwischen der Volksrepublik China und den USA. Zuletzt sorgte ein chinesischer Ballon für Aufruhr, der unter anderem über dem US-Bundesstaat Montana schwebte, der Basis amerikanischer Atomraketen. Die US-Regierung identifizierte ihn als Spionageballon und ließ ihn abschießen. Nach dieser Episode scheint es noch unwahrscheinlicher als zuvor, dass die USA ihre Wirt-

schaftssanktionen gegen China bald wieder aufheben könnten. Diese konzentrieren sich besonders auf einen Bereich, in dem die USA China für besonders verwundbar halten: Sie verbieten die Ausfuhr von Mikrochips der neuesten Generation, die in China bislang nicht hergestellt werden können.

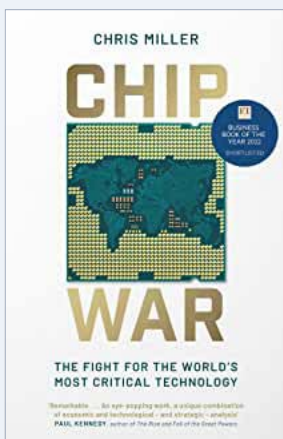
Von solchen Chips aber ist China ebenso abhängig wie jede andere moderne Volkswirtschaft. Mikrochips finden sich in allen denkbaren Geräten: nicht nur in Computern und Smartphones, sondern auch in Autos und Kühlschränken. Weder das Handy- noch das Stromnetz würden ohne sie funktionieren. Auch Waffensysteme wie Drohnen und Raketen benötigen Computerchips – und eben auch Spionagetechnik. Zugleich ist die Herstellung der modernsten Chips so kompliziert, dass weltweit nur wenige Unternehmen dazu in der Lage sind.

Chris Miller, Associate Professor für Internationale Geschichte an der Fletcher School der Tufts University, erklärt in seinem Buch »Chip War«, warum gerade diese Technik heute eine solche politische und wirtschaftliche Bedeutung hat. Dabei ist der Titel etwas irreführend. Denn Miller beschränkt sich keineswegs auf die Gegenwart, in denen der Zugang zu Mikrochips zu einer Art geopolitischen Waffe geworden ist. Stattdessen erzählt er ihre Geschichte von den Anfängen vor rund 80 Jahren bis

heute. Dazu hat Miller, der sich bereits zuvor in seinen Büchern mit internationaler Wirtschaftsgeschichte beschäftigt hat, Archive auf mehreren Kontinenten ausgewertet und über 100 Wissenschaftler, Ingenieure, Manager und Politiker interviewt.

Zu Beginn seines Buches führt Miller anschaulich vor Augen, wie Tüftler und Forscher ausgehend von frühen Computern aus störungsanfälligen Vakuumröhren die ersten Transistoren entwickelten. Schon die Vakuumröhren konnten mit Hilfe des Dualsystems Berechnungen erstellen: Eine eingeschaltete Röhre wurde als 1 codiert, eine ausgeschaltete Röhre als 0. Ähnliches war auch mit Transistoren auf Basis von Silizium oder Germanium möglich, wie Experimente Mitte der 1940er-Jahre zeigten. Ende der 1950er-Jahre gelang es dann zwei Forschergruppen unabhängig voneinander, mehrere Transistoren auf einem einzigen Stück Silizium miteinander zu verbinden, was die Zuverlässigkeit erhöhte und den Stromverbrauch reduzierte. Der erste »integrierte Schaltkreis«, der erste »Mikrochip«, war erfunden.

Es folgte eine bis heute andauernde enorm schnelle technische Entwicklung. Nach Moore's Law, benannt nach Gordon Moore, einem der Erfinder des Chips und dem späteren Gründer der Chipfirma Intel, verdoppelt sich die Zahl der Transistoren auf einem Chip jedes Jahr. Tatsächlich wurden auf einem Chip im Jahr 1961



Chris Miller
Chip War

Rowohlt
€ 30,-

vier Transistoren verbaut. Auf dem A14-Prozessor eines iPhones hingegen kommen 11,8 Milliarden Transistoren zum Einsatz. Nicht nur an dieser Stelle versammelt Miller schier unglaubliche Zahlen. Die Transistoren, so erklärt er, sind mittlerweile kleiner als menschliche Zellen, ja selbst in einem Coronavirus würden sie Platz finden. Und der Speziallaser der deutschen Firma Trumpf, der nur ein Teil einer Produktionsmaschine für Chips ist, besteht aus exakt 457 329 Teilen.

Aufgrund dieser Komplexität beherrschen nur wenige Firmen weltweit bestimmte Schritte im Produktionsprozess. Viele Mikrochips werden in den USA von Unternehmen wie Apple designt, dann aber in Südkorea oder Taiwan von Auftragsfertigern wie Samsung oder TSMC hergestellt. Allein Chips aus Taiwan stehen mittlerweile für 37 Prozent der jährlich neu produzierten Computer-

leistung. Zusammengebaut, getestet und verpackt werden die Chips dann erneut anderswo, etwa in Malaysia.

»Chip War« liest sich wie eine Mischung aus Entdeckerstory mit samt teils schrulligen Forschern im ersten Teil und einem spannenden Wirtschaftskrimi im zweiten. Denn auf die frühe Phase der Chipentwicklung folgte ein beinhardter Konkurrenzkampf zwischen Unternehmen und zwischen Staaten. Diese strebten danach, die wichtige Technologie entweder im eigenen Land zu entwickeln, wie aktuell China, oder sie wollten, wie die USA, die Chipherstellung in China gerade verhindern.

Lediglich die mittleren von Millers insgesamt 54 kurzen Kapiteln wiederholen sich etwas: Immer kleiner werden die Chips, in immer neue Länder werden deren Produktionsschritte ausgelagert. Zudem überzeugen Millers Spekulationen zu militärstrategischen Überlegungen Chinas

gegenüber Taiwan weniger als jene Kapitel, in denen er sich ganz der Chip-Geschichte widmet. Doch das sind Kleinigkeiten, die den Eindruck kaum trüben.

Es ist keine gewagte Prognose, dass die weltweite Abhängigkeit von Mikrochips in den kommenden Jahren und Jahrzehnten nicht abnehmen wird. In Bereichen wie der künstlichen Intelligenz stehen wir wahrscheinlich erst am Anfang einer Entwicklung, die mehr Rechenleistung und weitere speziell angefertigte Chips erfordern wird. Angesichts dessen wäre eine deutsche Übersetzung von Millers Buch wünschenswert, die ihm hier zu Lande die Aufmerksamkeit bringen würde, die es im englischen Sprachraum bereits hat.

Tobias Sauer ist Journalist. Er hat Politologie, Geschichte und Ethnologie studiert.

Ist der Mensch Physik?

Laut der Autorin spricht derzeit nichts dagegen, dass sich unsere Existenz aus den Eigenschaften der Atome erklären lässt.

► Sind wir mehr als nur ein Haufen Atome? Das ist die Leitfrage, mit der uns die in Frankfurt forschende theoretische Physikerin Sabine Hossenfelder auf eine Reise zu den großen Rätseln der Physik einlädt. Kann man das Bewusstsein als emergentes Phänomen verstehen? Entsteht es also lediglich aus dem komplexen Zusammenspiel einer sehr großen Menge an kleineren Komponenten? Oder benötigt man gar die eigenartig anmutenden Gesetze der Quantenphysik, um zu verstehen, wie Bewusstsein entsteht? Letztere Idee vertritt zum Beispiel der Physik-Nobelpreisträger Roger Penrose (geb. 1931), auch wenn die experimentelle Evidenz dazu fehlt.

Die Autorin gliedert ihr Buch in neun Kapitel, zu denen sie noch drei Interviews mit anderen Forschern stellt (unter anderem auch mit Roger

Penrose). Kapitel eins handelt davon, dass in einer deterministischen Welt Vergangenheit und Zukunft fest miteinander verknüpft sind, so dass es keinen klaren Anhaltspunkt gibt, was das Jetzt sein könnte. Albert Einstein (1879–1955) sprach in diesem Zusammenhang von einer »hartnäckigen Illusion«. Das zweite Kapitel beschreibt die Entstehung des Universums. Insbesondere weist Hossenfelder darauf hin, dass nicht alle Ideen, die man zu der Frage nach der Natur des Urknalls liest, durch Beobachtungen unterscheidbar sind. Dann ist es also eine Geschmacksfrage, welches Weltbild man bevorzugt.

Die nächsten beiden Kapitel behandeln das Zusammenspiel großer Mengen an Teilchen. Zum einen geht es natürlich darum, wie aus dem Gesetz der Zunahme der Entropie ein effektiver Zeitpfeil ent-



Sabine Hossenfelder

Mehr als nur Atome

Siedler Verlag, München 2023

€ 26,-

steht. Zum anderen aber auch um Emergenz, dass also neue, kollektive Muster auftreten können, wenn man viele wechselwirkende Komponenten hat. Nach derzeitigem Wissensstand spricht nichts dagegen, dass Bewusstsein ein emergentes Phänomen ist. Und da das die Erklärung mit den wenigsten Annahmen ist, bevorzugt die Autorin sie.

Kapitel fünf beschreibt die Paradoxia des quantenmechanischen Messprozesses. Die Autorin ist aber skeptisch, ob die Idee richtig ist, dass sich bei jeder Quantenmessung das Universum aufspaltet, und so eine wahnwitzige Zahl an Multiversen existiert. Denn ist das nicht eine viel kompliziertere Erklärung, als einfach das Zufallselement zu akzeptieren? Im sechsten Abschnitt diskutiert Hossenfelder, wie der freie Wille, den Menschen empfinden, mit der deterministischen Physik zusammenpasst. Noch deutlicher als bei der Frage nach dem Bewusstsein bewegt sich der Text hier auf philosophischem Terrain, und so ist es vielleicht auch

nicht verwunderlich, dass die Autorin zeigt, wie unscharf die Definition des Begriffs »freier Wille« ist, so dass kein direkter Widerspruch bleibt.

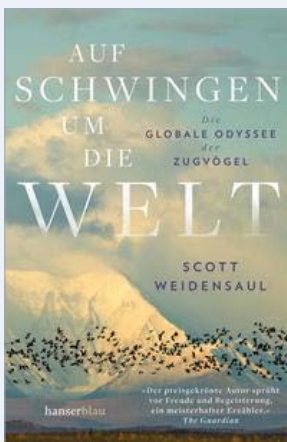
Weiter geht es mit einem Kapitel über das anthropische Prinzip – ob das Universum also so beschaffen ist, wie es ist, da wir ja offensichtlich darin leben. Etwas ungewöhnlich ist die Frage in Kapitel acht: Denkt das Universum? Und schließlich folgt noch ein Kapitel über die Vorhersagbarkeit von menschlichem Verhalten, was natürlicherweise auch eine Diskussion über künstliche Intelligenz beinhaltet. Ein Abschnitt über ChatGPT fehlt aber, denn die englische Originalausgabe des Buches ist bereits 2022 erschienen.

Hossenfelders Text ist anspruchsvoll, und den Argumenten ist nicht immer leicht zu folgen. Doch die aufzubringende Konzentration lohnt sich, denn der rote Faden, der sich durch das gesamte Buch zieht, ist eine gute Maxime, um Gehörtes oder Gelesenes einzuordnen: Die Autorin unterscheidet sauberlich zwischen

Fakten, die experimentell belegt (oder zumindest theoretisch belegbar) sind, und dem, was plausible Geschichte, Spekulation, Mythos oder Religion ist. Die experimentellen Grundlagen kommen für meinen Geschmack etwas zu kurz – denn schließlich bildet das die Basis des Realitätsbegriffs der theoretischen Physikerin. An manchen Stellen scheint sie einfach davon auszugehen, dass die Leser ein Physikstudium genossen haben.

Dem Titel des Buches hätte ich noch ein Fragezeichen angehängt. Denn so klingt es, als ob das Buch die These vertritt, dass das Menschsein mehr sei als nur eine komplexe Ansammlung von Atomen. Aber das ist ja gerade die Frage, um die es geht: Sind wir mehr als nur Atome?

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



Scott Weidensaul

Auf Schwingen um die Welt

hanserblau Verlag, München
2022

€ 26,-

Neue Bedrohungen für Zugvögel

Welche neuen Gefahren der Klimawandel und die Umweltzerstörung für Zugvögel bedeuten, schildert der Naturjournalist Scott Weidensaul.

Die Gefahren, denen Zugvögel ausgesetzt sind, haben sich in den letzten Jahrzehnten vervielfacht, verantwortlich dafür sind – natürlich – wir Menschen. Und weil die Flugrouten seit Jahrtausenden in der DNA der Vögel festgeschrieben sind, sind sie selten flexibel genug, um den Gefahren auszuweichen.

Scott Weidensaul beginnt seine Reise am Gelben Meer in China. Die schlammigen Küstenstreifen voller wirbelloser Kleinsttiere dienen seit jeher als weltweit wichtigster Rastplatz für Zugvögel. Nun aber hat China einen Großteil dieser bedeutenden Schlammflächen in Bauland verwandelt, und die dürrtigen Naturschutzentscheidungen werden nicht

von Biologen, sondern von ahnungslosen Bürokraten am Schreibtisch getroffen. Erst 2019 hat die UNESCO dieses Gebiet zum Welterbe erklärt und China so zum Schutz verpflichtet.

Ein anderes großes Problem stellen nachts beleuchtete Wolkenkratzer da, denn Zugvögel werden genauso magisch vom Licht angezogen wie Motten. Allein in New York sterben so jedes Jahr etwa 90.000 Tiere. Besonders gefährlich ist die seit 2002 jährlich stattfindende Veranstaltung »Tribute in Light«, die mit zwei riesigen Lichtstrahlen, die die Twin Towers symbolisieren, die 9/11-Opfer ehren soll. Das Problem ist, dass im September die Hauptrei-

sezeit der Sperlingsvögel ist und diese sich verwirrt in den Lichtkegeln verfangen und keinen Ausweg sehen, bis sie erschöpft zu Boden sinken. Schließlich hat man sich darauf geeinigt, dass das Licht für kurze Zeit abgeschaltet wird, wenn sich mehr als tausend Tiere in dem Lichtkegel befinden.

Auch das unter anderem durch Pestizide verursachte Insektensterben beschleunigt den Rückgang des Vogelbestandes, denn Insekten sind die Hauptnahrungsquelle für Vögel.

Auch die Folgen, die der menschengemachte Klimawandel auf Vögel hat, werden im Buch geschildert: Vögel, die auf Sumpfwiesen angewiesen sind, sind besonders von Überschwemmungen betroffen, die auf den Klimawandel zurückzuführen sind. Und die Schneeeulen in der Arktis nisten nur, wenn es genügend Lemminge als Nahrung gibt. Die Lemminge wiederum benötigen für ihren Nachwuchs lockeren Schnee. Wärmere und feuchtere Winter führen so zu weniger Lemmingen und damit zu weniger Schneeeulen.

Die Wälder werden genauso wie die Küstenstreifen durch Bebauung und Zerstückelung zerstört, was wiederum die jahrtausendealten Routinen der Zugvögel durcheinanderbringt und die Artenvielfalt allgemein verringert.

Eine der größten Gefahren befindet sich ganz in der Nähe: in Südeuropa. Auf Zypern, in Frankreich und Italien werden immer noch Singvögel mit Netzen und Leimruten gefangen, um sie zu verspeisen. Vogelfang mit Leimruten ist seit 2021 zwar EU-weit verboten, wird in ländlichen Gebieten aber immer noch praktiziert. Der Autor ist auf Zypern mit Vogelschüt-

zern unterwegs, die in Guerilla-Aktionen Vögel befreien, Netze und Leimruten zerstören sowie heimlich Videos von Vogeljägern drehen und das Material der Polizei übergeben.

Aber nicht nur der reiche Westen macht sich schuldig. Die Maori in Neuseeland töten traditionell jedes Jahr 360.000 junge Sturmtaucher, und auch die einheimischen Jäger auf Karibikinseln stellen eine besondere Gefahr dar, denn dort ist der Artenschutz nicht so ausgeprägt wie auf dem Festland.

Aber auch andere, oft vor Jahrhunderten auf Schiffen eingeschleppte Tiere können sehr gefährlich sein. Weidensaul begleitet eine Charity-Exkursion reicher Vogelfreunde zu einer Insel namens Rat, um Gelder zu sammeln und um die Insel von ihren namensgebenden Ratten zu säubern. Für die Nager sind die Vögel eine leichte Beute: Denn diese haben den Instinkt, in jedem Fall auf ihrem Ei sitzen zu bleiben, um ihren Nachwuchs zu beschützen. So werden sie von Ratten lebendig gefressen anstatt wegzufiegen.

Außer über die zahlreichen Gefahren lernt man aber auch viel über die auf den ersten Blick absurde Biologie der Zugvögel. Zum Beispiel variieren die Größe und die Funktionsfähigkeit der Organe stark nach den Bedürfnissen. Vor einem Langstreckenflug schrumpfen sie, um Gewicht zu sparen, und im Gegenzug werden für den Winter Fett und Muskelmasse aufgebaut. Die Hoden der Männchen des Knutts, eines amselgroßen Strandläufers, schrumpfen während der Überwinterung in Australien auf winzige Größe, um im arktischen Brutgebiet auf tausendfache Größe anzuschwellen. Der Gesang wird

dann zum hormonellen Zwang, wofür auch der Teil ihres Gehirns wächst, der für das Singen zuständig ist.

Neue Erkenntnisse ergeben sich durch immer feinere Trackingtechnologien: So können Geolokatoren an allen Vögeln angebracht und ihre Wege verfolgt werden. Die so identifizierten lebenswichtigen Rastplätze dienen zum Beispiel als Basisinformation für den Naturschutz.

Weidensaul war ursprünglich Zeitungsreporter und schreibt im klassischen Reportagestil. Er schildert seinen eigenen Werdegang vom Kind, das sich schon immer für Vögel begeistert hat, über den Moment, wo er beruflich mit einem Ornithologen zu tun hatte, der ihm später das Beringen von Vögeln beibrachte, bis zu seinen Reisen um die Welt für den Vogelschutz. So ist er immer mehr in die Rolle des Freilandforschers hineingewachsen. Jeder Ornithologe und jede Biologin werden mit Namen genannt und kurz skizziert. Zum Beispiel erwähnt er, dass der Bart eines Vogelschutzkollegen bei jeder Begegnung mehr graue Sprenkel aufweist.

Die Botschaft des Buches ist klar: Vogelschutz ist auch Menschen-schutz. Wir leben alle auf einem Planeten, und von einem effektiven Schutz der Brut-, Rast- und Winterquartiere profitieren auch Menschen, die sich gar nicht für Vögel interessieren.

Paul Riemann hat Kulturwissenschaften, Philosophie und Philologie studiert und arbeitet als Journalist in Berlin.

Spektrum
der Wissenschaft

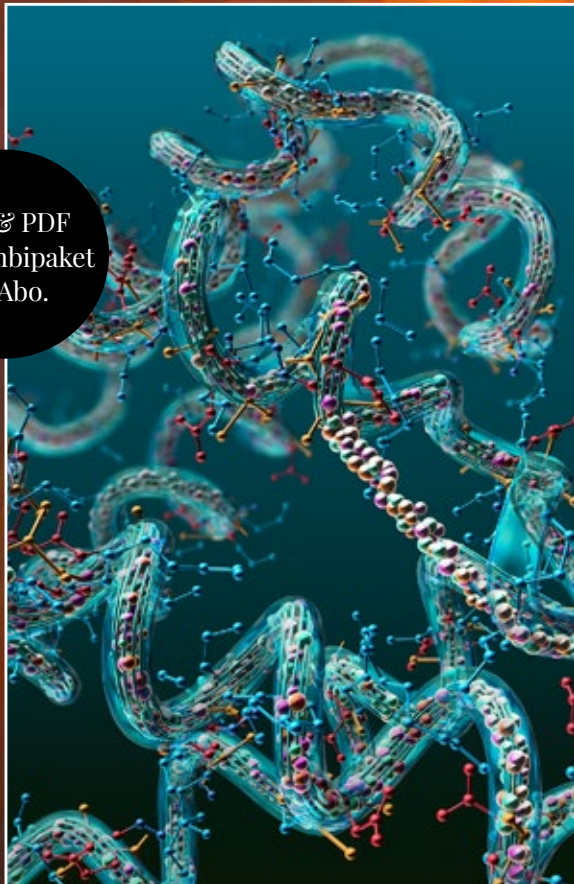
DIE WOCHE

Das wöchentliche digitale Wissenschaftsmagazin

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.

**IM
NEUEN
LOOK!**

App & PDF
als Kombipaket
im Abo.



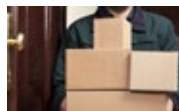
Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR
24
15.06.
2023

DESIGNER-PROTEINE

KI schreibt den Code des Lebens um

Künstliche Intelligenz nimmt die Bausteine des Lebens ins Visier. Völlig neue Proteine, designt von Sprachmodellen auf der Basis von ChatGPT oder KI-Bildgeneratoren, könnten weit über das hinausgehen, was die biologische Evolution geschaffen hat.



NACHHALTIG LEBEN

Unverzichtbarer
Konsumverzicht



KULTUREN STATT KANINCHEN

Können Stammzellen
Tierversuche ersetzen?

- » Magdalenenflut: Als das Mittelalter den Boden unter den Füßen verlor
- » Impfstoff gegen Chikungunyavirus kurz vor Zulassung?
- » Temperaturrekord: Warum der Nordatlantik so extrem warm ist
- » Waldbrände belasten Städte mit Ozon

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

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

