

Spektrum

der Wissenschaft



Rätsel Bewusstsein

Wie das Gehirn
die Welt erschafft

- KOSMOLOGIE** Erste Einblicke ins junge Weltall
- GENE DRIVES** Erbgut mit Durchsetzungskraft
- NATURGESETZE** Wie universell sind sie wirklich?

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT



Jetzt bei Ihrem
Zeitschriftenhändler!

Spektrum
der Wissenschaft
KOMPAKT

SPORT

Warum Bewegung gesund ist

Abnehmen Was unser Körpergewicht bestimmt	Demenz Ein Training gegen Alzheimer	Körperabwehr Sport fördert das Immunsystem
---	---	--

Print | 5,90 €
Download | 4,99 €

gewicht bestimmt
Was unser Körper

Abnehmen

gegen Alzheimer
Ein Training

Demenz

das Immunsystem
Sport fördert

Körperabwehr

Mehr als 250 Digitalausgaben zur Wahl!
www.spektrum.de/kompakt



EDITORIAL RÄTSELHAFTES GEHIRN

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

► Als ich mich an das Schreiben dieses Editorials machte, fiel mir sofort meine allererste Arbeitswoche im Verlag ein. Damals, im September 2001, musste ich ein passendes Titelthema für die Startausgabe des gerade neu gegründeten Magazins »Gehirn&Geist« finden. Ich begann mental die großen Fragen der Neurowissenschaft durchzugehen und hatte schnell die Antwort – ganz klar: »Auf der Suche nach dem Bewusstsein«!

Bald zwei Jahrzehnte später zählt das Thema immer noch zu den großen ungelösten Rätseln der Wissenschaft. Wie schaffen es knapp drei Pfund glibberiges Nervengewebe, ein Gefühl für das eigene Selbst zu erzeugen? Seit Jahrzehnten fahnden Neurowissenschaftler nach den »neuronalen Korrelaten des Bewusstseins« im Gehirn, ohne eine definitive Antwort zu finden. Was ist so besonders an diesem Organ aus knapp 100 Milliarden Nervenzellen im Unterschied zu anderen Geweben? Einfach die schiere Anzahl an Zellen? Nicht unbedingt, denn rund drei Viertel aller Hirnneurone befinden sich im Kleinhirn, das für das Bewusstsein keine Rolle spielt. Wichtiger scheint hier die spezielle neuronale Verschaltung in der Großhirnrinde zu sein. Der Neurowissenschaftler Christof Koch, Direktor des Allen Institute for Brain Science in Seattle, berichtet ab S. 12 über den aktuellen Stand der Forschung zum Thema und stellt die beiden heute populärsten Theorien dazu vor, wie Bewusstsein im Gehirn entsteht.

Daneben ist unser Denkorgan ständig damit beschäftigt, die einlaufenden Sinneseindrücke zu einem Abbild der Welt um uns herum zusammenzufügen. Laut neueren Erkenntnissen läuft dieser Vorgang aber gewissermaßen rückwärts ab, wie der Kognitionsforscher Anil Seth von der University of Sussex ab S. 18 beschreibt. Demzufolge stellt das Gehirn zunächst Prognosen über die Umwelt auf und gleicht diese erst danach mit den Sinnessignalen ab. Somit leben wir alle in einer Art kontrollierter Halluzination und in unserer jeweils eigenen, einzigartigen Welt. Das könnte nicht nur soziale Phänomene wie Filterblasen im Internet erklären, sondern auch das Entstehen psychischer Störungen wie Schizophrenie. Bei diesen Patienten dominiert die innere Hypothese derart, dass sie nicht mehr gemäß den Umweltinformationen korrigiert wird und ein Eigenleben entfaltet. Das nennen wir dann Wahnvorstellung.

Mit diesen beiden Artikeln beginnen wir unsere neue Serie über die Erforschung des menschlichen Gehirns und seiner Aufgaben. Eine bewusstseinserweiternde Lektüre wünscht Ihnen



NEU AM KIOSK!

In unserem **Spektrum** SPEZIAL Archäologie – Geschichte – Kultur 4.19 dreht sich alles um Helden: von der Antike bis zur Neuzeit.

IN DIESER AUSGABE



DANIEL T. KSEPKA

Am Bruce Museum in Greenwich, USA, forscht der Paläontologe über Reptilien, die im Schatten der Dinosaurier lebten und heute nahezu unbekannt sind (S. 36).



ERNST A. WIMMER, GEORG OBERHOFER

Die beiden Biologen erkunden neue Ansätze zur Schädlingsbekämpfung. Dabei setzen sie auf »Gene Drives«: die beschleunigte Ausbreitung von Genen in Populationen, etwa um Krankheitsüberträger unschädlich zu machen (S. 46).



TEVA VERNOUX, CHRISTOPHE GODIN, FABRICE BESNARD

Drei Wissenschaftler von der Ecole normale supérieure in Lyon bringen ab S. 52 Botanik und Mathematik zusammen, um die Bildung der erstaunlichen Muster von Pflanzen nachzuvollziehen.

INHALT

- 3 EDITORIAL
- 6 SPEKTROGRAMM
- 26 FORSCHUNG AKTUELL
Form versus Textur
Bildererkennung bei Mensch und KI.
Detektoren für die Lücke im Spektrum
Ein Graphentransistor für Terahertzstrahlung.
Auf der ganzen Erde wird es wärmer
Zum ersten Mal in den letzten 2000 Jahren steigt die Temperatur global.
Wie Knochen entstehen
Neue Einblicke in den Wachstumsmechanismus.
- 35 SPRINGERS EINWÜRFE
Der Haken an der Sache
Ist Werkzeuggebrauch eine Frage der Kultur oder der Umwelt?
- 62 ZEITREISE
- 78 SCHLICHTING!
Schneeverlust unter dem Gefrierpunkt
Bei Phasenübergängen ist die Temperatur nicht alles.
- 80 IMPRESSUM
- 81 FREISTETTERS FORMELWELT
Vollkommen logisch
Die Mathematik der Suchmaschinen.
- 86 REZENSIONEN
- 94 LESERBRIEFE
- 96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE
- 98 VORSCHAU

Neue Serie: Das menschliche Gehirn

12 KOGNITION **WAS IST BEWUSSTSEIN?**

Erst allmählich lüften Naturwissenschaftler ein Geheimnis, das Philosophen seit der Antike beschäftigt.

Von Christof Koch

18 WAHRNEHMUNG **UNSERE INNEREN UNIVERSEN**

Mittels ständig aktualisierter Prognosen über die äußere Welt konstruiert das Gehirn seine eigene Realität als kontrollierte Halluzination.

Von Anil K. Seth

36 PALÄONTOLOGIE **DAS GEHEIMNIS DER VERBORGENEN REPTILIEN**

Die Choristodera, eine wenig bekannte Reptiliengruppe, überlebte im Gegensatz zu den Dinosauriern das Massenaussterben am Ende der Kreidezeit.

Von Daniel T. Ksepka

46 GENETIK **IM BUND MIT SELBSTSÜCHTIGEN GENEN**

Wie »Gene Drives« dabei helfen können, Schädlingsorganismen und Krankheitserreger zu bekämpfen.

Von Ernst A. Wimmer und Georg Oberhofer

52 BOTANIK **ZAHLENSPIELE IM REICH DER PFLANZEN**

Pflanzen weisen komplizierte Formen auf, die uns schon lange faszinieren. Nach und nach entschlüsseln Forscher die dazugehörigen Mechanismen.

Von Teva Vernoux, Christophe Godin und Fabrice Besnard

64 ATMOSPHÄRE **DER WOLKENSTAUBSAUGER VON SPITZBERGEN**

Um Klimamodelle zu verbessern, untersucht ein Wissenschaftler Wasserdampf und Feinstaub aus der saubersten Luft der Welt.

Von Tamara Worzewski

69 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **ATEMNOT AUF ZELLULOID**

Wie realistisch ist die Chemie in den Filmen »Das Boot« und »Apollo 13«?

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

72 ASTRONOMIE **BLICK INS DUNKLE ZEITALTER**

Eine neue Generation von Radioteleskopen liefert Signale aus der Frühzeit des Kosmos.

Von Davide Castelvecchi

82 WISSENSCHAFTSPHILOSOPHIE **WIE UNIVERSELL SIND NATURGESETZE?**

Neue Serie: Grundbegriffe der Wissenschaft Die fundamentalen Regeln der Physik gelten nur unter idealen Bedingungen. Doch die gibt es praktisch nie.

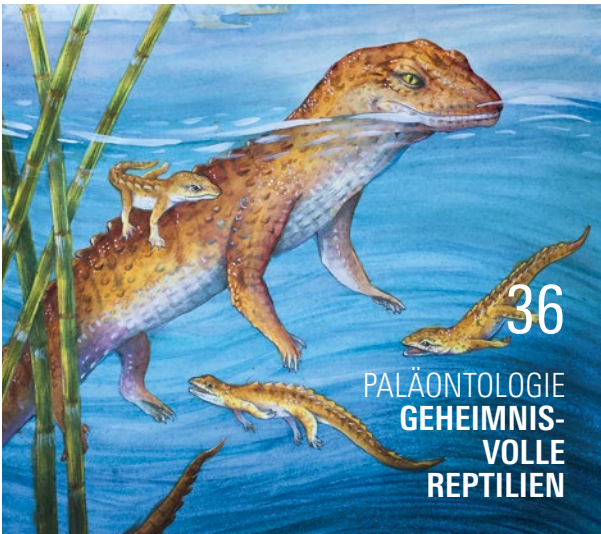
Von Alexander Mäder



12

TITELTHEMA
WAS IST BEWUSSTSEIN?

MONSTU / STOCK.ADOBE.COM



EMMA SKORNIK

52

BOTANIK
**ZAHLENSPIELE
IM REICH DER
PFLANZEN**

RAZEL / STOCK.ADOBE.COM



36

PALÄONTOLOGIE
**GEHEIMNIS-
VOLLE
REPTILIEN**



TAMARA WODZIEWSKI

64

ATMOSPHERE
**DER WOLKEN-
STAUBSAUGER VON
SPITZBERGEN**



ARCHANGELIOWS / STOCK.ADOBE.COM, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

82

WISSENSCHAFTSPHILOSOPHIE
**WIE UNIVERSELL SIND
NATURGESETZE?**



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

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

SPEKTROGRAMM



STEINZEIT-SCHÖNHEIT

► Kurze Ärmchen, hängende Brüste, ein schwerer Bauch und ein ausladendes Gesäß – diese Körpermerkmale sind typisch für die so genannten Venusfigurinen. Mehr als 100 solcher Steinzeitstatuetten sind inzwischen

aus Europa bekannt. Das wohl berühmteste Exemplar ist die »Venus von Willendorf« aus Österreich.

Nun haben französische Archäologen des Institut national des recherches archéologiques préventives

(Inrap) eine gut erhaltene, etwa vier Zentimeter große Figurine aus Kalkstein ausgegraben – am Fundplatz Renancourt bei Amiens im Norden des Landes. Die Forscher entdeckten die Figur in den Überresten eines Jagd-



STÉPHANE LANDELOT / INRAP

lagers, in dem Menschen vor 23000 Jahren ihre Beute zerteilten und neben Steingeräten auch Figurinen anfertigten. Der Fund, der hier von allen Seiten zu sehen ist, stammt aus dem Gravettien, einer der letzten Kulturstufen des

Paläolithikums am Ende der letzten Eiszeit. Wen die üppige Nachbildung darstellen soll oder welche Bedeutung sie hatte, ist dagegen unklar. Denkbar wäre, dass es sich um Bildnisse von Mutter- oder Fruchtbarkeitsgöttinnen

handelte. Einige Archäologen vertreten hingegen die Meinung, dass sie eine angesehene Frau der Gemeinschaft wiedergibt.

Pressemitteilung des Inrap, Dezember 2019

ASTRONOMIE

WEISSER ZWERG KNABBERT AN EXOPLANET

► Astronomen haben ein besonderes Sternsystem aufgespürt, in dem ein Weißer Zwerg das Gas eines nahen Riesenplaneten aufsaugt. Bisher hielten Experten die ferne Region des Weltalls für ein Doppelsternsystem, in dem zwei Weiße Zwerge um einen gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Ein Team um Boris Gänsicke von der University of Warwick hat nun mit dem Very Large Telescope in Chile genauer hingesehen und die Zusammensetzung des Lichts von WD J0914+1914 analysiert.

Die Forscher fanden dabei klare Indizien dafür, dass es sich bei dem System bloß um einen einzelnen Zwergstern handelt, der aber von einer Trümmerscheibe umgeben ist. Solche

Gebilde sind im Orbit von Weißen Zwergen alles andere als selten: Da die ausgebrannten Sterne sehr dicht sind, können ihre Gezeitenkräfte Kleinplaneten zerreißen und die Trümmer zu einer kreisenden Staubscheibe zermahlen.

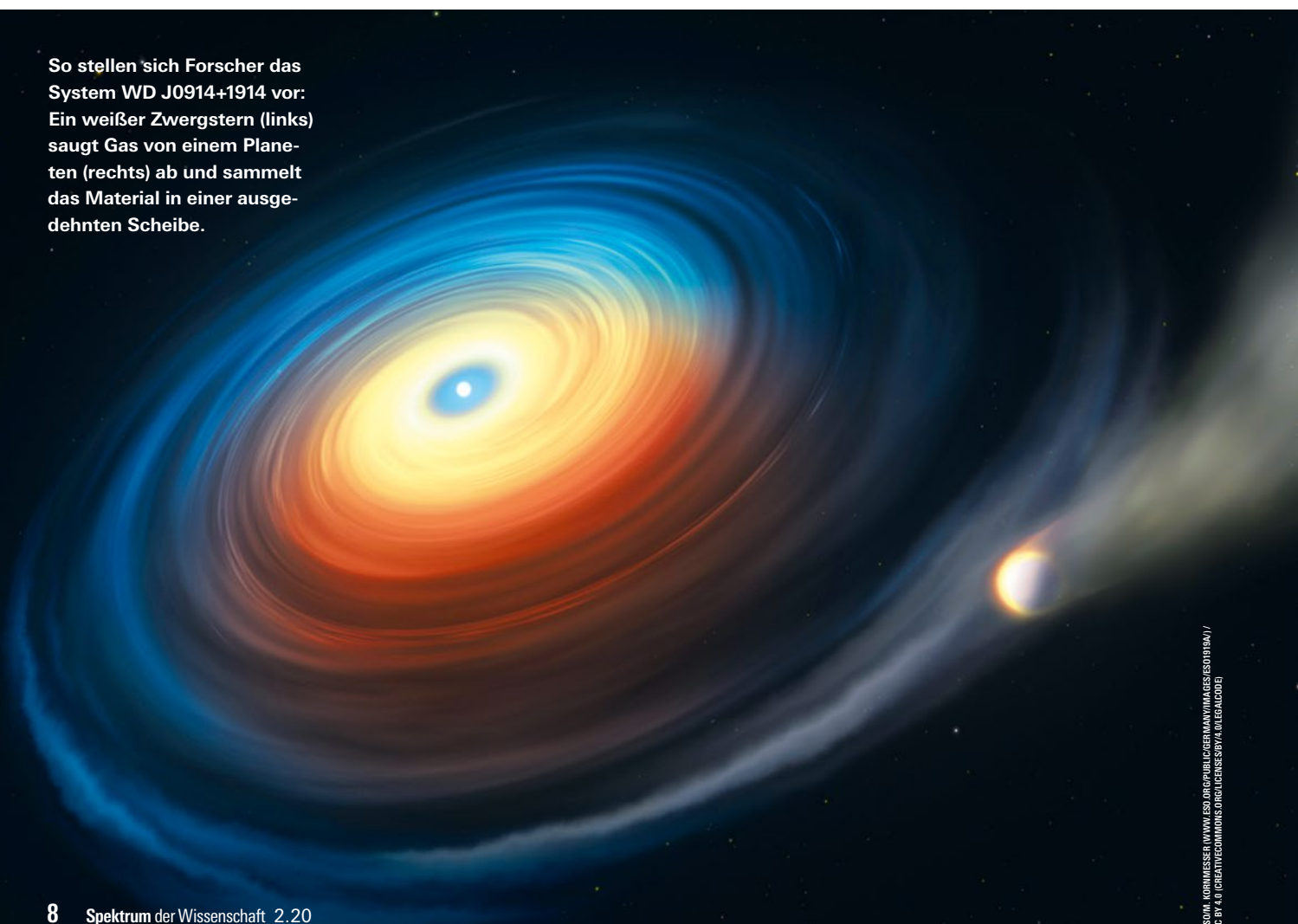
Im Fall von WD J0914+1914 besteht die Scheibe allerdings lediglich zu kleinen Teilen aus Eisen oder Silizium, wie sie typisch wären für zerstückeltes Gestein. Stattdessen enthält sie vorrangig Wasserstoff, Sauerstoff und Schwefel. Damit gleiche die Zusammensetzung dem Inneren der Eisriesen Uranus und Neptun in unserem Sonnensystem, so das Team. Am besten ließen sich die Messdaten daher durch einen solchen Riesenplaneten erklä-

ren, der den Weißen Zwerg am Rand der Scheibe umkreist.

Der Planet wird demnach von der extremen Ultraviolettstrahlung des 27500 Grad Celsius heißen Weißen Zwergs getroffen. Das müsste die Atmosphäre des Planeten nach und nach verdampfen lassen. Langfristig wird WD J0914+1914 seinen planetaren Begleiter jedoch nicht ganz aufessen, sondern weiterhin nur daran knabbern: Sofern der Planet heute so groß wie Neptun ist, könnte der Weiße Zwerg gerade einmal vier Prozent von ihm verputzen, bevor er in 350 Millionen Jahren so weit erkaltet ist, dass kein Gasdiebstahl mehr messbar ist.

Nature 10.1038/s41586-019-1789-8, 2019

So stellen sich Forscher das System WD J0914+1914 vor: Ein weißer Zwergstern (links) saugt Gas von einem Planeten (rechts) ab und sammelt das Material in einer ausgedehnten Scheibe.

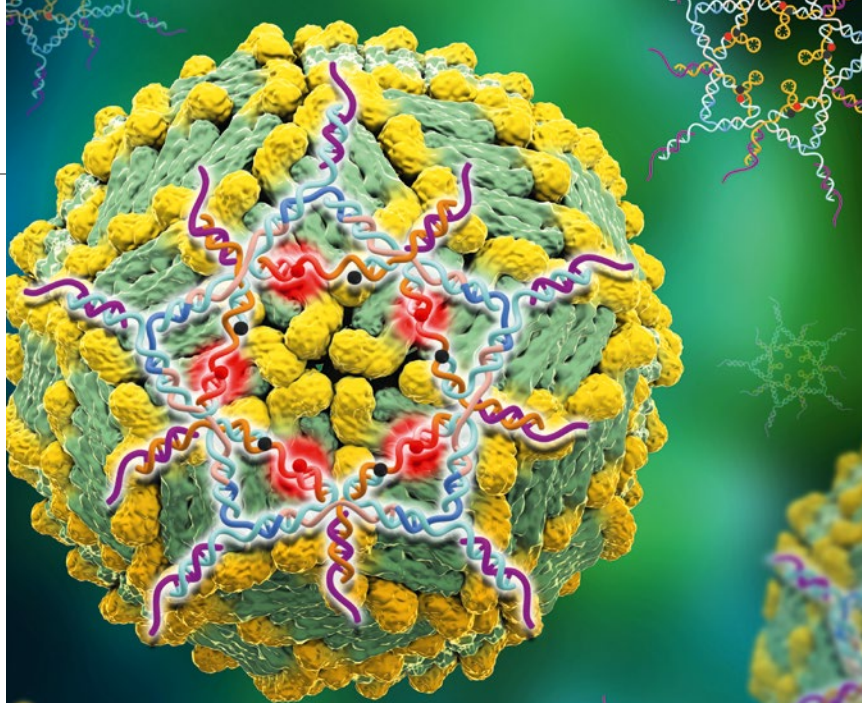


MEDIZIN DNA-STERN LEGT VIREN LAHM

► Ein Gerüst aus Makromolekülen schnappt sich zielgenau bestimmte Viren aus der Blutbahn und leuchtet dann auf. Die Nanostruktur besteht aus DNA-Ketten und erinnert an einen fünfzackigen Stern, wie die Entwickler um Xing Wang von der University of Illinois berichten. An den Enden hängen dabei jeweils zwei spezielle Aptamere – kurze Nukleotidketten, die wegen ihrer räumlichen Anordnung an die ED3-Hüllprotein-Cluster des Denguevirus andocken.

Der Stern verbindet sich daher bei Kontakt an mehreren Stellen fest mit Dengueviren. Die Erreger können danach deutlich schlechter in die Wirtszelle eindringen. Vor allem aber erlauben es die DNA-Sterne, eine Infektion nun deutlich besser nachzuweisen, weil sie nach dem Andocken an die Viren aktiv fluoreszieren. Im Vergleich zum Standardtest auf Dengueviren im Blut sei der neue Ansatz etwa 100-mal sensitiver, so die Gruppe um Wang.

Die DNA-Bastelarbeit ist eine verbesserte und weiterentwickelte Version einer Virusfalle aus Sialin-



XING WANG, RENNESSEER POLYTECHNIC INSTITUTE (PRP)

Ein aus DNA konstruiertes sternförmiges Makromolekül kann sich an Dengueviren heften.

säure-Ketten, die das Forscherteam vor einiger Zeit getestet hat: Die Ketten banden sehr spezifisch an Grippeviren und verhinderten bei Mäusen, dass die eingefangenen Erreger an Sialinsäure-Andockstationen von Lungenzellen binden, was für den Fortgang der Infektion entscheidend ist.

Die DNA-Sternfalle sollte nun ebenso gut funktionieren, dabei aber deutlich verträglicher sein und keine

Nebenwirkungen verursachen, hoffen die Biochemiker. DNA-Gerüste werden üblicherweise innerhalb von 24 Stunden in Leber und Niere von Säugetieren abgebaut. Im Prinzip kann man die vielseitigen Fallen für verschiedenste Viren verwenden, indem man die Gerüststruktur verändert und andere Aptamere einbaut. Folgegenerationen der sternförmigen DNA-Virusfalle könnten außerdem Anhänge erhalten, die nach dem Kontakt mit Viren das Immunsystem alarmieren und dafür sorgen, dass Falle und gebundenes Virus abgebaut werden.

Nature Chemistry 10.1038/s41557-019-0369-8, 2019

EVOLUTION SIND HEUTIGE MENSCHENAFFEN SCHLAUER ALS UNSERE VORFAHREN?

► Möglicherweise würden die heutigen Schimpansen und Gorillas in einem fiktiven Intelligenztest besser abschneiden als die frühen Mitglieder unseres Stammbaums wie *Australopithecus*. Das vermuten Wissenschaftler um Roger Seymour von der University of Adelaide in Australien.

Ihre Einschätzung beruht auf der Annahme, dass sich die Gehirnleistung am besten über die Dichte der Verknüpfungen zwischen Neuronen messen lässt. Diese Kennzahl, so argumentieren sie, sei aufschlussreicher als ein reiner Größenvergleich der Gehirne. Die Synapsen genannten Kontaktstellen zwischen Nervenzellen stellen anteilmäßig die höchsten

Anforderungen an die Energieversorgung – das menschliche Gehirn wendet etwa 70 Prozent seiner Energie für deren Aktivität auf. Deshalb schlagen Seymour und sein Team vor, die Gehirne der Primatenarten anhand ihrer Blutversorgung zu vergleichen. Je leistungsfähiger ein Gehirn, desto mehr »Treibstoff« muss über das Blut zugeführt werden. Und die Blutversorgung, die sich an der Größe der Arterien ablesen lässt, sei bei einem Gorilla beispielsweise doppelt so hoch wie bei »Lucy« und ihren weiter entfernten Verwandten, etwa *Ardipithecus*.

Insgesamt wirkt es so, als hätten die Mitglieder der Ahnenreihe des

Homo sapiens in den vergangenen Millionen Jahren aus einer schlechteren Startposition stark aufholen müssen. Heute liegen wir bei einem Verhältnis von Gehirngröße zu Blutzufuhr, das dem der Menschenaffen entspricht – haben allerdings ein viel größeres Gehirn.

Nach derzeitigem Kenntnisstand haben Australopithecinen keine Werkzeuge angefertigt. Erst von ihren Nachkommen, den frühen Angehörigen der Gattung *Homo*, existieren Hinweise auf ein solches Verhalten, das höhere kognitive Leistungen erfordert.

Proceedings of the Royal Society B 10.1098/rspb.2019.2208, 2019

BIOLOGIE HERZSCHLAG VON BLAUWALEN

► Wenn Blauwale tauchen, reduzieren sie ihren Pulsschlag auf ein extremes Minimum – und das, obwohl sie in der Tiefe akrobatische Hochleistungen erbringen: Bei ihren »Fresssprüngen« pflügen sie mit weit aufgerissenem Maul durch den Ozean, um eine möglichst große Menge kleiner Krebse aufzunehmen. Das kostet immens viel Kraft, ändert aber den Herzschlag nur unwesentlich.

Diese und andere Einblicke in den Puls der größten Tiere, die je auf der Erde gelebt haben, hat nun eine Forschergruppe um Jeremy Goldbogen von der Stanford University zu Tage gefördert. Den Meeresbiologen gelang es, Blauwale in der kalifornischen Monterey Bay ein

Beim Abtauchen und Jagen senken Blauwale ihren Herzschlag bis auf wenige Schläge pro Minute (bpm).

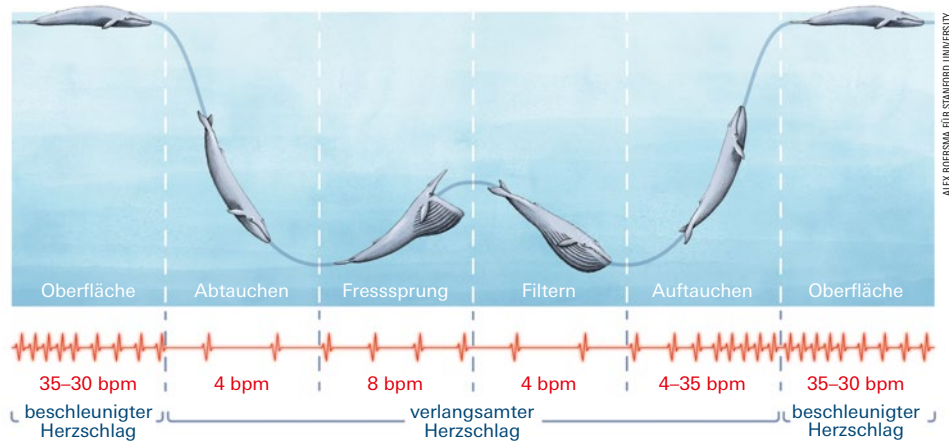
EKG-Gerät anzuheften. Mitunter eine Viertelstunde lang konnten sie so den Herzschlag der Tiere erfassen. Dann lösten sich die Saugnäpfe der Sensoren, und die Forscher fischten die Gerät aus dem Meer.

Den Daten zufolge schlägt das Herz der Giganten beim Tauchen lediglich alle 7 bis 15 Sekunden einmal. Der Puls beschleunigt sich erst wieder, wenn die Tiere nach mehreren Minuten an die Wasseroberfläche zurückkehren. Beim Atemholen und Auftanken ihrer Sauerstoffreserven legt das geschätzt 300 Kilogramm schwere Herz dann kräftig an Tempo zu – mit einer Takt-

rate von bis zu 35 Schlägen in der Minute (beats per minute, bpm). Das ist zwar immer noch etwa halb so schnell wie der Ruhepuls eines Menschen, aber höher, als Forscher bislang errechnet hatten.

Eine Taktrate von zirka 40 Schlägen pro Minute dürfte ungefähr das Maximum dessen sein, was ein so großes Herz leisten kann. Oberhalb dieses Wertes müssten sich die Wände wieder zusammenziehen, noch bevor sie ihre volle Ausdehnung erreicht hätten.

PNAS 10.1073/pnas.1914273116, 2019



INFORMATIK DER KOAUTOR VON SHAKESPEARE

► William Shakespeares Bühnenstück »Heinrich VIII.« ist nicht nur bekannt dafür, dass bei seiner Aufführung 1613 das Globe Theater niederbrannte, sondern auch für seine merkwürdige Entstehungsgeschichte. Wie Mitte des 19. Jahrhunderts dem englischen Literaturwissenschaftler James Spedding auffiel, stammen weite Passagen des Stücks überhaupt nicht aus der Feder des berühmten Schriftstellers.

Stattdessen ermittelte Spedding einen anderen Vielschreiber namens John Fletcher als wahrscheinlichen Koautor. Dieser These hat sich seitdem die Mehrheit der Experten angeschlossen. Offen ist allerdings, an welchen Stellen des Dramas genau die Autorenschaft wechselt und ob manche Szenen eine Gemeinschaftsproduktion sind.

Diesem Problem widmete sich nun Petr Plecháč von der Tschechischen Akademie der Wissenschaften mit Hilfe einer künstlichen Intelligenz. Er trainierte ein neuronales Netz mit Wort- und Reimstatistiken darauf, Shakespeare und Fletcher auseinanderzuhalten. Zusätzlich nahm der Wissenschaftler noch Dramen eines weiteren Zeitgenossen in die Trainingsbeispiele auf: die eines gewissen Philip Massinger, der ebenfalls als möglicher als Koautor von »Heinrich VIII.« gilt.

Plecháč betrachtete dabei ein Fenster, das er Vers für Vers weiter-schob. Dadurch war es ihm möglich, auch einen fliegenden Wechsel der Autorenschaft zu identifizieren. Beispielsweise ergaben seine Tests, dass in der zweiten Szene des dritten Akts

ab Zeile 2200 ein Abschnitt gemischter Autorenschaft beginnt. Erst am Ende der Szene, mit dem Beginn des vierten Akts, übernimmt wieder allein Shakespeare das Ruder – und nicht Fletcher, wie Experten im 19. Jahrhundert vermuteten.

Insgesamt jedoch decken sich die Ergebnisse des tschechischen Forschers sehr gut mit den Erkenntnissen Speddings. Auch wenn sein Modell für die Frage nach dem Autor eines Abschnitts immer nur Wahrscheinlichkeiten ausspuckt und keine definitiven Antworten, kann Plecháč immerhin praktisch ausschließen, dass der vermeintliche Dritte im Bunde, Philip Massinger, einen substanziellen Beitrag geleistet hat.

arXiv 1911.05652, 2019

HIRNFORSCHUNG BIOMARKER FÜR ALKOHOLSUCHT

► Ein Team um Cody Siciliano vom Massachusetts Institute of Technology ist auf einen Hirnschaltkreis gestoßen, an dem sich ablesen lässt, ob Mäuse einmal süchtig nach Alkohol werden. Die Forscher trainierten mehrere Versuchstiere zunächst darauf, ein akustisches Signal mit einer wohlschmeckenden Zuckerlösung zu assoziieren. Anschließend bekamen die Nager jedes Mal, wenn es ertönte, Alkohol zur Verfügung gestellt. Mehrere Tage lang durften sie sich nach Herzenslust bedienen.

Am Ende konnten die Wissenschaftler die Mäuse in drei verschie-

dene Gruppen einteilen. Ein Teil der Tiere schleckte nur gelegentlich am Alkohol, andere wiederum häufig. Die dritte Gruppe entwickelte hingegen ein regelrechtes Suchtverhalten und konsumierte die Flüssigkeit selbst dann noch, wenn die Autoren ihr einen besonders bitteren Beigeschmack zusetzten. Mit Hilfe eines speziellen Bildgebungsverfahren beobachteten die Forscher vor, während und nach dem Versuch die Aktivität in zwei Hirnregionen, die an der Verhaltenssteuerung beteiligt sind: im medialen präfrontalen Kortex und im zentralen Höhlengrau, einer Ansammlung von Nervenzellen im Hirnstamm.

Siciliano und seine Kollegen entdeckten, dass sich anhand der Kommunikation dieser beiden Areale vorhersagen ließ, ob die Mäuse ein

Alkoholproblem entwickeln würden. Schalteten sie das Netzwerk mit optogenetischen Methoden ein, konnten sie das Verlangen der Tiere nach Alkohol steigern. Deaktivierten sie es, interessierten sich die Tiere nur noch wenig dafür.

Aus Sicht der Forscher hat man damit zum ersten Mal einen Hirnschaltkreis entdeckt, mit dem sich präzise vorhersagen lässt, welche Mäuse einmal zwanghaft Alkohol zu sich nehmen werden – noch Wochen, bevor sie dieses Verhalten überhaupt zeigen. Ob das Netzwerk auch an der Entstehung anderer Verhaltenssuchte beteiligt ist, weiß man aber noch nicht. Ebenso ist unklar, ob sich die Erkenntnisse auf den Menschen übertragen lassen.

Science 10.1126/science.aay1186, 2019

SONNENSYSTEM ENCELADUS' TIGERSTREIFEN

► Der Saturnmond Enceladus ist berühmt für seine »Tigerstreifen«: Die parallel verlaufenden Klüfte sind von Geysiren gespickt, die immer wieder Wasserdampf und Eispartikel aus Enceladus' unterirdischem Ozean ins Weltall feuern. Ein Team um Douglas Hemingway von der Carnegie Institution for Science in Washington D.C. glaubt nun erklären zu können, woher die Fissuren kommen und wieso sie sich nur am Südpol gebildet haben.

Demnach sind Mutterplanet Saturn und die elliptische Bahn des Mondes für die Risse verantwortlich: Die Schwerkraft des riesigen Gasplaneten zerrt mal stärker und mal schwächer an Enceladus' Ozean, was diesen immer wieder aufheizt und anschließend abkühlen lässt. Beim Abkühlen dehnt sich das Wasser aus und drückt von innen gegen die Eiskruste. Da diese an den Polen vergleichsweise dünn ist, brach sie dort zuerst.

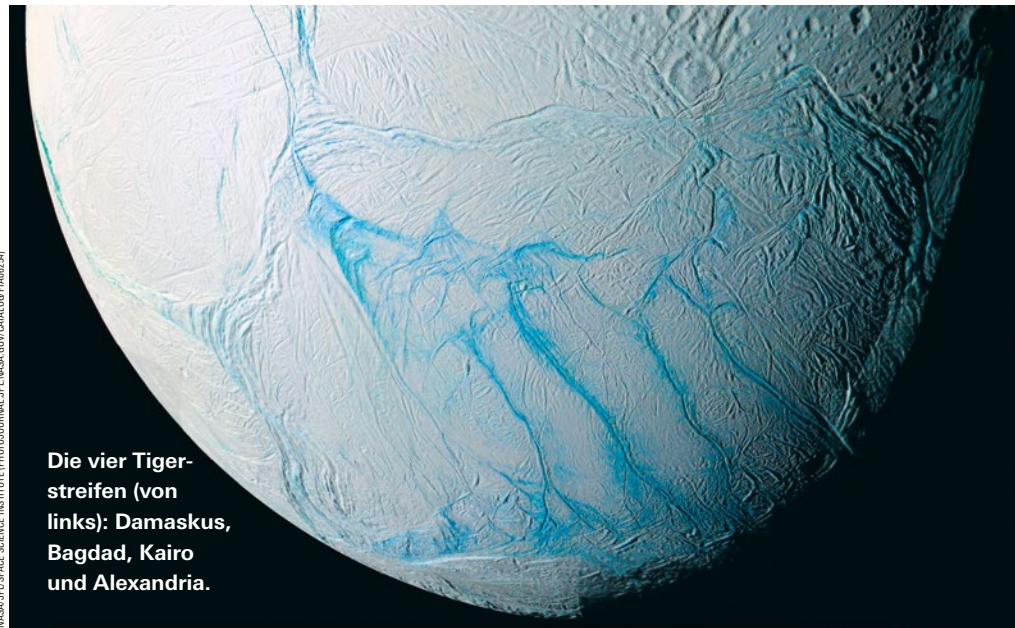
Eher per Zufall habe es dabei den Südpol getroffen, vermuten die Forscher, wodurch sich zunächst lediglich der Riss namens »Bagdad« bildete. Da der Ozean die Spalte schnell ausfüllte, verringerte sich der Druck

am Nordpol. Dafür ließ Bagdad seine Schwestern »Damaskus« und »Kairo« entstehen. Sie gehen vermutlich auf Eisbrocken aus den Geysiren des ersten Risses zurück: Das in die Höhe geschossene Material fiel wieder herab, sammelte sich auf Bagdads Rändern und bog diese etwas nach unten.

Das setzte die Eiskruste großflächig unter Spannung – und ließ sie letztlich auf beiden Seiten aufreißen, 35 Kilometer von Bagdad entfernt.

Damaskus und Kairo wiederholten dieses Spiel, was zu zwei weiteren Streifen führte: Einer von ihnen heißt »Alexandria«, der andere ist weniger gut sichtbar und trägt daher keinen Namen. Was den Dominoeffekt letztlich gestoppt hat, ist nicht sicher. Möglicherweise setzten die neuen Risse weniger Eispartikel frei, oder die Kruste ist weiter abseits des Südpols zu dick, als dass sie brechen könnte.

Nature Astronomy 10.1038/s41550-019-0958-x, 2019



Die vier Tigerstreifen (von links): Damaskus, Bagdad, Kairo und Alexandria.

NASA/JPL/SPACE SCIENCE INSTITUTE (PHOTO JOURNAL JPL/NASA GOV/CALIFORNIA/REZEN)

KOGNITION WAS IST BEWUSSTSEIN?

**Erst allmählich lüften
Naturwissenschaftler
ein Geheimnis, das
Philosophen seit der
Antike beschäftigt.**



Christof Koch ist wissenschaftlicher Direktor und Präsident des Allen Institute for Brain Science in Seattle (USA). Zusammen mit dem Nobelpreisträger Francis Crick (1916–2004) entwickelte er

eine neue Theorie des Bewusstseins.

► spektrum.de/artikel/1693092

NEUE SERIE

Das menschliche Gehirn

Teil 1: **Februar 2020**

Was ist Bewusstsein?

Christof Koch

Unsere inneren Universen

Anil K. Seth

Teil 2: **März 2020**

Das Netzwerk des Geistes

Max Bertolero und Danielle S. Bassett

Tief verbunden

Sarah Deweerdt

Teil 3: **April 2020**

Die Intentionsmaschine

Richard Andersen

Der freie Wille und die Algorithmen

Liam Drew

Das menschliche Gehirn gehört zu den größten Rätseln der Biologie: Wo sitzt hier der Ursprung unseres Bewusstseins?



► Unser Bewusstsein setzt sich aus dem zusammen, was wir erleben: einer Melodie, die sich im Kopf festgesetzt hat; dem süßen Geschmack von Schokoladenmousse auf der Zunge; einem pochenden Zahnschmerz; der bedingungslosen Liebe für das eigene Kind – sowie der schmerzlichen Gewissheit, dass all diese Gefühle irgendwann einmal enden werden.

Die Herkunft und Art solcher Wahrnehmungen, in der Philosophie Qualia genannt, blieben von der Antike bis zur Gegenwart ein Rätsel. Etliche moderne Philosophen, darunter Daniel Dennett von der Tufts University, empfinden die Existenz eines Bewusstseins in einem bedeutungsleeren Universum als derartige Zumutung, dass sie es schlicht zur Illusion erklären. Sie leugnen also entweder die Existenz von Qualia, oder sie argumentieren, dass diese niemals sinnvoll wissenschaftlich untersucht werden können.

Würde ich dieser Annahme zustimmen, könnte ich mich kurzfassen. Ich bräuchte nur zu erklären, warum Sie und ich, wie die meisten Menschen, überzeugt sind, überhaupt Gefühle zu haben. Wenn mich aber ein Zahnabszess plagt, wird selbst das scharfsinnigste Argument dafür, dass der Schmerz reine Einbildung sei, meine Qualen um keinen Deut lindern. Da ich dieser zweifelhaften Lösung des Leib-Seele-Problems wenig Sympathie entgegenbringe, fahre ich also fort.

Nehmen wir das Bewusstsein als gegeben hin, können wir versuchen, seine Beziehung zur objektiven, naturwissenschaftlich erfassbaren Welt zu verstehen. Mein früherer Kollege, der Nobelpreisträger Francis Crick, und ich entschieden uns vor mehr als einem Vierteljahrhundert, philosophische Diskussionen über das Bewusstsein beizulegen und uns lieber auf dessen materielle Hintergründe zu konzentrieren. Denn erst wenn wir verstehen, wie unser Gehirn Bewusstsein erzeugt, können wir uns der Lösung des grundlegenden Problems – was ein solches ausmacht – widmen.

Wir suchten insbesondere nach neuronalen Korrelaten des Bewusstseins (neural correlates of consciousness,

NCC), also den minimalen Hirnaktivitäten, die notwendig sind, um eine spezifische Bewusstseins erfahrung zu erzeugen. Was muss zum Beispiel in Ihrem Kopf geschehen, damit Sie Zahnschmerzen spüren? Feuern dafür einige Nervenzellen in einer magischen Frequenz? Regen sich spezielle »Bewusstseinsneurone«? Und in welchen Hirnregionen lägen jene Zellen?

Wichtig bei der Definition der NCC ist das Wörtchen »minimal«. Schließlich könnte das gesamte Gehirn als NCC betrachtet werden, da es Tag für Tag Wahrnehmung erzeugt. Der Sitz des Bewusstseins lässt sich aber weiter eingrenzen. Betrachten wir etwa das Rückenmark, den einen halben Meter langen Nervenfasernstrang in der Wirbelsäule mit ungefähr einer Milliarde Nervenzellen. Wird es durch eine Verletzung in der Nackenregion vollständig durchtrennt, ist der Betroffene gelähmt. Er kann in der Folge weder Arme noch Beine bewegen, Berührungen auf seinem Körper spüren oder Darm und Blase kontrollieren. Er erfährt das Leben allerdings weiterhin in all seiner Vielfalt – er sieht, hört, riecht und fühlt, und sein Gedächtnis funktioniert wie vor dem Ereignis, das sein Leben so radikal verändert hat.

Das Kleinhirn ist – trotz hoher Neuronenzahl – für das Bewusstsein ohne Belang

Oder nehmen wir das Kleinhirn. Dieser evolutionsgeschichtlich alte Hirnteil im hinteren Bereich des Kopfs kontrolliert die Motorik, also die Körperhaltung, den Gang sowie den flüssigen Ablauf komplexer Bewegungen. Schreiben, Klavierspielen, Eiskunstenlaufen oder Bergsteigen – an solchen Tätigkeiten ist das Kleinhirn beteiligt. Hier findet man die wohl schönsten Neurone des Gehirns, die Purkinjezellen, deren Dendriten sich wie eine Fächerkoralle ausbreiten und komplexe elektrische Dynamiken aufweisen. Und besonders verblüffend: Das Kleinhirn besitzt viermal mehr Nervenzellen als das gesamte restliche Gehirn, etwa 69 Milliarden.

Was passiert mit dem Bewusstsein, wenn Teile des Kleinhirns durch einen Schlaganfall oder durch das Messer eines Chirurgen verloren gehen? Sehr wenig! Die Betroffenen beklagen zwar zahlreiche Beeinträchtigungen – sie können etwa nicht mehr flüssig Klavier spielen oder auf der Tastatur tippen –, jedoch nie den Verlust einer Facette ihres Bewusstseins. Sie sehen, hören und fühlen normal, sie behalten eine Ich-Empfindung, sie erinnern sich an Vergangenes und planen die Zukunft. Selbst wer bereits ohne Kleinhirn auf die Welt kommt, leidet kaum unter einem eingeschränkten Bewusstsein.

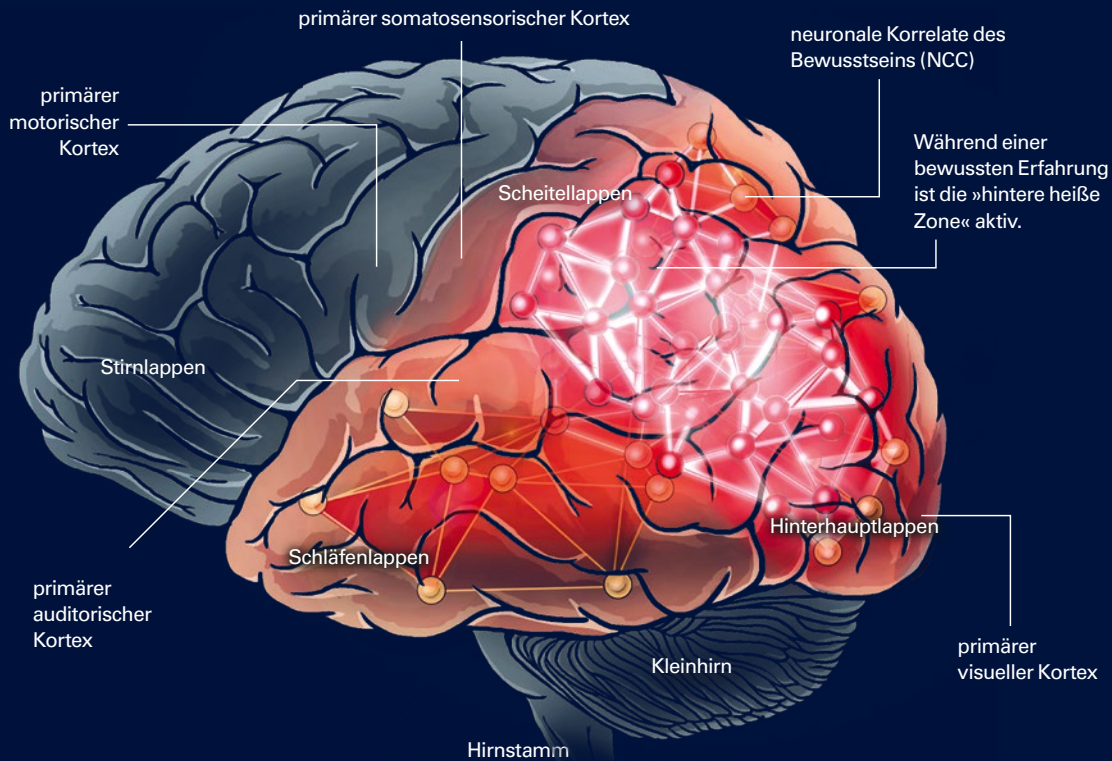
Die gesamte Struktur des Kleinhirns ist demnach für das Bewusstsein ohne Belang. Warum? Die Antwort liegt möglicherweise in seiner außerordentlich gleichförmigen Verschaltung. Im Kleinhirn finden wir einen fast gänzlich vorwärtsgerichteten Informationsfluss: Eine Neuronengruppe leitet Signale an die nächste, welche sie an eine dritte weitergibt. Komplexe Rückkopplungsschleifen, in denen elektrische Aktivität hin und her kreist, fehlen. Da das Entstehen bewusster Wahrnehmungen Zeit braucht, gehen die meisten Experten davon aus, dass Rückkopplungen daran beteiligt sein müssen. Außerdem ist das Klein-

AUF EINEN BLICK DAS RÄTSEL DES BEWUSSTEN ERLEBENS

- 1** In den hinteren Bereichen der Großhirnrinde suchen Forscher nach den neuronalen Korrelaten des Bewusstseins (NCC).
- 2** Bewusstseinszustände lassen sich per Elektroenzephalografie grob quantifizieren.
- 3** Zwei Haupttheorien wollen den Ursprung des Bewusstseins erklären: die eine über einen globalen neuronalen Arbeitsraum, die andere als Summe der im System integrierten Information.

Spuren des Bewusstseins

Bewusstes Denken ist eng mit der Großhirnrinde verknüpft, einer kompliziert gefalteten Schicht aus Nervengewebe. Jede Erfahrung geht mit einem spezifischen Zusammenspiel von Nervenzellaktivitäten einher, den neuronalen Korrelaten des Bewusstseins (NCC). Sie ereignen sich in der so genannten hinteren heißen Zone des Scheitel-, Schläfen- und Hinterhauptlappens. Anhand der Komplexität neuronaler Reize nach einem magnetischen Impuls lässt sich der Grad des Bewusstseins einer Person messen.



MESA SCHUMACHER / SCIENTIFIC AMERICAN JUNI 2018

hirn funktional in hunderte oder mehr eigenständige Rechenmodule aufgeteilt. Jedes arbeitet parallel mit eigenen, sich gegenseitig nicht überlappenden Ein- und Ausgangssignalen, um Bewegungen oder kognitive Prozesse zu steuern. Die einzelnen Module interagieren nur sehr selten miteinander, was für bewusstes Erleben unabdingbar wäre.

Das Bewusstsein erscheint folglich nicht wie der Geist aus der Flasche, sobald ein beliebiges Nervengewebe gereizt wird. Es braucht einen zusätzlichen Faktor. Den finden wir in der grauen Substanz der Großhirnrinde: dem komplex vernetzten Nervenzellgewebe an der Außenseite des Gehirns. Alle verfügbaren Anhaltspunkte sprechen dafür, dass der sensorische und motorische Teil der Großhirnrinde, der so genannte Neokortex, Gefühle erzeugt.

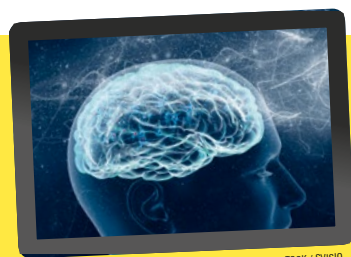
Der Sitz des Bewusstseins lässt sich weiter eingrenzen, beispielsweise durch Experimente, bei denen den beiden Augen verschiedene Reize präsentiert werden. Stellen Sie sich vor, ein Foto von Donald Trump erscheint vor Ihrem linken Auge und eines von Angela Merkel vor Ihrem rech-

ten. Naheliegender wäre, dass Sie eine eigenartige Überlagerung von Trump und Merkel wahrnehmen. Doch tatsächlich werden Sie für einige Sekunden Trump sehen, der dann verschwindet und von Merkel ersetzt wird, bevor wiederum Trump erscheint. In einem endlosen Tanz wechseln sich die beiden Bilder ab. Neurowissenschaftler nennen dieses Phänomen binokulare Rivalität. Auf Grund des mehrdeutigen Inputs kann sich das Gehirn nicht entscheiden: Ist es Trump oder Merkel?

Wenn Sie während dieses Versuchs in einem Magnetresonanztomografen liegen, der Ihre Hirnaktivität aufzeichnet, werden die Experimentatoren sehen, wie sich Neurone in einem breiten Areal im Kortex regen. Diese so genannte »hintere heiße Zone« (posterior hot zone, PHZ) erstreckt sich über Teile des Scheitel-, des Schläfen- und des Hinterhauptlappens (siehe »Spuren des Bewusstseins«, oben). Sinneseindrücke, wie die Bilder von Merkel und Trump, nehmen wir erst wahr, wenn sie in diesem Areal verarbeitet werden. Eine Information, die über den Sehnerv im primä-

ren visuellen Kortex ankommt, entspricht somit nicht dem, was wir bewusst sehen; das Bild, das wir wahrnehmen, entsteht erst in der hinteren heißen Zone.

Stimuliert man dieses Areal mit Stromstößen – zum Beispiel, um es vor der chirurgischen Entfernung eines nahe gelegenen Hirntumors oder Epilepsieherds genauer zu untersuchen –, löst das bei Patienten eine Vielzahl ausgeprägter Wahrnehmungen und Gefühle aus. Manche sehen Lichtblitze, geometrische Formen oder verzerrte Gesichter, andere berichten von akustischen Halluzinationen oder einem Gefühl von Vertrautheit oder Irrealität, einige überkommt das Bedürfnis, einen bestimmten Körperteil zu bewegen, und so fort. Anders, wenn der vordere Teil des Gehirns erregt wird: Dann treten so gut wie keine Wahrnehmungen auf.



Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

ISTOCK / SVSISO

Weitere Erkenntnisse verdanken wir Neurologiepatienten aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Um Tumoren zu entfernen oder um epileptische Anfälle zu lindern, schnitten Chirurgen damals bisweilen große Teile des präfrontalen Kortex aus dem Gehirn. Auffällig an den Behandelten war vor allem, wie unauffällig sie danach blieben. Zwar litten viele nach der Operation unter Nebenwirkungen wie motorischen Störungen, Tics oder Problemen mit der Impulskontrolle. Die meisten erholten sich aber rasch vom Eingriff und lebten etliche Jahre ohne Anzeichen dafür, dass dieser ihre bewusste Erfahrung deutlich verändert hätte. Dagegen kann das Entfernen bereits kleiner Bereiche der hinteren Großhirnrinde, wo die heiße Zone liegt, das Empfindungsspektrum stark einschränken. Die Patienten verlieren etwa die Fähigkeit, Gesichter zu erkennen oder Bewegungen, Farben oder Räume wahrzunehmen.

Mittels »Zap-and-Zip« lässt sich das Bewusstsein messen

Demnach scheint alles, was wir sehen, hören oder sonst empfinden, von Regionen im hinteren Kortex erzeugt zu werden. Doch worin unterscheidet sich dieses Areal vom Rest der Großhirnrinde? Die Wahrheit lautet: Wir wissen es nicht. Allerdings, und das ist das Spannende, kommen Neurowissenschaftler der Antwort jetzt womöglich näher.

Anfang der 2000er Jahre entwickelten Giulio Tononi von der amerikanischen University of Wisconsin-Madison und Marcello Massimini, heute an der Universität Mailand in Italien, eine »Zap-and-Zip« genannte Technik, mit der sie prüfen können, ob jemand bei Bewusstsein ist oder nicht. Das »Zap« der Methode ist ein starker magnetischer Impuls, ausgehend von einer isolierten Drahtspule, die Forscher an den Schädel ihrer Probanden halten. So erzeugen

sie einen kurzzeitigen elektrischen Strom im dem Magnetfeld ausgesetzten Hirngewebe. Die zum Feuern angeregten Neurone lösen eine Kettenreaktion aus: Sie erregen oder hemmen weitere Nervenzellen, und deren Aktivität breitet sich wie eine Welle in der Großhirnrinde aus. Mittels am Schädel angebrachter Elektroden lassen sich diese elektrischen Signale im Elektroenzephalogramm (EEG) messen. Zusammen bilden die Aufzeichnungen von unterschiedlichen Stellen am Schädel eine Art Videosequenz der Nervenzellaktivität.

Die Aktivitätsmuster waren weder vorhersehbar noch wirkten sie völlig zufällig. Vielmehr erwies es sich als umso wahrscheinlicher, dass eine Person bewusstlos war, je vorhersagbarer die elektrischen Rhythmen an- und abschwollen. Die Wissenschaftler werteten die Muster aus, indem sie die Daten mit dem aus der Computertechnik bekannten »Zip«-Algorithmus komprimierten. So ließ sich die Komplexität der Hirnreaktion abschätzen: Wache Probanden wiesen einen »Störungskomplexitätsindex« (perturbational complexity index, PCI) zwischen 0,31 und 0,70 auf. Im Tiefschlaf oder in Narkose sank der Wert auf unter 0,31. Massimini und Tononi testeten ihre Zap-and-Zip-Methode an 48 hirngeschädigten, aber ansprechbaren Patienten. Bei allen Probanden bestätigte die Messung das Vorliegen von Bewusstsein.

Anschließend wandte das Team Zap-and-Zip bei 81 Personen an, bei denen entweder ein minimales Bewusstsein oder ein Wachkoma diagnostiziert worden war. Die Körperreaktionen aller 38 Patienten der ersten Gruppe gingen über einfache Reflexe hinaus. 36 von ihnen klassifizierte die Methode korrekt als bei Bewusstsein; zwei wurden als bewusstlos fehldiagnostiziert. Bei den 43 Wachkoma-Patienten war jeder Kommunikationsversuch am Krankenbett fehlgeschlagen. Die Technik erkannte bei 34 von ihnen eine Bewusstlosigkeit, die restlichen neun zeigten ähnliche Hirnaktivitäten wie Wache. Diese Patienten waren womöglich bei Bewusstsein, jedoch unfähig, sich mit anderen zu verständigen.

Aktuell arbeiten die Forscher daran, Zap-and-Zip zu standardisieren und zu optimieren. Sie wollen die Methode auch bei psychiatrischen und pädiatrischen Patienten anwenden können. Doch selbst wenn sie die exakten neuronalen Mechanismen aufspüren, die jeglicher bewussten Erfahrung zu Grunde liegen, wird das zahlreiche fundamentale Fragen zum Bewusstsein nicht beantworten können, darunter: warum diese Neurone und nicht andere? Warum diese Frequenz und nicht eine andere? Und das zentrale Mysterium: Wie erzeugt ein hochvernetzter Klumpen Hirnmasse jegliche Wahrnehmung?

Um uns solchen Fragen zuwenden zu können, braucht es zunächst ein testbares wissenschaftliches Modell, das vorhersagt, unter welchen Voraussetzungen ein physikalisches System – wie ein komplexer Schaltkreis, sei er aus Neuronen oder aus Siliziumtransistoren – etwas wahrnimmt. Nur mit einem solchen Modell können wir erschließen, welche Systeme prinzipiell dazu fähig sind, bewusst zu erleben. Ohne überprüfbare Vorhersagen basiert jede Spekulation über Bewusstsein auf Intuition, die erfahrungsgemäß kaum als Leitfaden taugt.

Zum Ursprung von Bewusstsein haben sich zwei Haupttheorien herauskristallisiert. Eine ist die des globalen neuronalen Arbeitsraums (global neuronal workspace, GNW) des Psychologen Bernard Baars sowie der Neurowissenschaftler Stanislas Dehaene und Jean-Pierre Changeux. Sie fußt auf der Beobachtung, dass mehrere Hirnbereiche Zugriff auf Informationen haben, die wir bewusst wahrnehmen. Wenn Sie aber zum Beispiel schnell tippen, machen Sie das automatisch. Fragt man Sie, wie Sie das schaffen, können Sie es nicht erklären, denn: Ihnen fehlt der bewusste Zugang zu dieser Information, die nur den zerebralen Schaltkreisen im sensorisch-motorischen System zur Verfügung steht.

Werden Maschinen jemals Bewusstsein erlangen?

Laut der GNW-Theorie entsteht Bewusstsein aus einer bestimmten Art der Informationsverarbeitung. Demnach gibt es im Gehirn so etwas wie eine »Informationstafel«, auf die verschiedene Hirnprozesse zugreifen können. Ein Teil der eingehenden sensorischen Eindrücke schafft es auf diese Plattform und steht so für kurze Zeit anderen kognitiven Prozessen zur Verfügung. Sie können hier abgelegte Daten verarbeiten und darauf reagieren: eine Antwort formulieren, eine Erinnerung abrufen oder speichern, eine Bewegung starten. Weil der Platz auf der Tafel begrenzt ist, wird uns zu jedem Zeitpunkt nur wenig gleichzeitig bewusst. Das neuronale Netzwerk, das die Informationen bereitstellt, liegt vermutlich im Stirn- und Scheitellappen. Heutige Computer besitzen eine vergleichbare kognitive Raffinesse noch nicht; das dürfte aber lediglich eine Frage der Zeit sein. GNW-Forscher gehen jedenfalls davon aus, dass Maschinen in Zukunft Bewusstsein erlangen werden.

Nur mit einem Modell können wir erschließen, welche Systeme dazu fähig sind, bewusst zu erleben

Die Theorie der integrierten Information (integrated information theory, IIT), die Tononi und andere, ich eingeschlossen, entwickelten, wählt einen anderen Ausgangspunkt: das Erlebte selbst. Jede erlebte Erfahrung besitzt bestimmte grundlegende Eigenschaften. Sie ist intrinsisch, existiert also nur für ihren »Besitzer«; sie folgt einer zeitlichen Chronologie (zum Beispiel registrieren wir, wie ein gelbes Taxi bremst, während ein brauner Hund über die Straße läuft), und sie ist spezifisch; sie unterscheidet sich von anderen bewussten Wahrnehmungen wie Szenen in einem Kinofilm. Außerdem bilden alle Eindrücke eine untrennbare Einheit. Wenn Sie etwa an einem warmen Sommertag auf einer Parkbank sitzen und Kindern beim

Spielen zusehen, lassen sich Teile des Erlebten – die durch Ihre Haare wehende Brise oder die Freude über Ihr lachen-des Kind – nicht in Einzelphänomene zerstückeln, die weiterhin denselben Gesamteindruck vermitteln.

Tononi postulierte, dass jedes komplexe Netzwerk, das in seiner Struktur Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung codiert, diese Eigenschaften besitzt und so ein gewisses Maß an Bewusstsein mitbringt. Wenn es einem System aber, wie dem Kleinhirn, an Verschaltung mangelt, wird es nichts bewusst wahrnehmen. Gemäß der IIT verfügt ein System über umso mehr Bewusstsein, je mehr Information es in sich integrieren und vielfältig verarbeiten kann.

Aus der IIT lässt sich auch der numerische Wert Φ (Phi) ableiten, der das im System inhärente Bewusstsein bezieht. Ist Φ gleich null, fehlt dem System ein Gefühl seiner selbst. Mit dem Wert steigt die in dem System steckende »kausale Fähigkeit« und damit das Bewusstsein. Das menschliche Gehirn, mit seinen Milliarden hochspezifisch vernetzten Nervenzellen, besitzt ein sehr hohes Φ , was auf ein großes Maß an Bewusstsein schließen lässt. Die IIT erklärt eine Reihe von Beobachtungen, etwa warum das Kleinhirn nicht zum Bewusstsein beiträgt und warum das Zap-and-Zip-Meter (das eine sehr grobe Annäherung von Φ misst) funktioniert.

Die IIT sagt voraus, dass keine noch so ausgereifte Computersimulation eines menschlichen Gehirns Bewusstsein erlangen kann – selbst, wenn sich ihre Antworten nicht von denen eines Menschen unterscheiden lassen. So wie die Simulation der Gravitation eines Schwarzen Lochs nicht die Raumzeit um den Computer verformt, kann die Programmierung eines Bewusstseins niemals eine bewusste Maschine hervorbringen. Bewusstsein lässt sich nicht »nachrüsten«; es muss im System integriert sein.

Zwei Herausforderungen liegen nun vor uns. Zum einen müssen wir die neuronalen Spuren des Bewusstseins weiter herausarbeiten. Immer bessere Werkzeuge helfen uns dabei, denn sie erlauben uns, das vielschichtige Zusammenwirken der Neurone unseres Gehirns genauer zu untersuchen. In Anbetracht der immensen Komplexität unseres zentralen Nervensystems wird dieses Unterfangen allerdings noch Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Zum Zweiten müssen wir die beiden konkurrierenden Theorien des Bewusstseins mit Daten bestätigen oder widerlegen. Vielleicht entsteht auch aus den Trümmern der beiden eine bessere Theorie, die das große Rätsel unserer Existenz befriedigend erklärt: wie aus einem drei Pfund schweren Organ mit der Konsistenz von Tofu ein Gefühl für das Selbst entspringt. ◀

QUELLEN

Casarotto, S. et al.: Stratification of unresponsive patients by an independently validated index of brain complexity. *Annals of Neurology* 80, 2016

Crick, F., Koch, C.: A framework for consciousness. *Nature Neuroscience* 6, 2003

Tononi, G.: An information integration theory of consciousness. *BMC Neuroscience* 5, 2004

A hand is shown painting a globe of the Earth against a dark blue background filled with stars. The hand is holding a paintbrush and is in the process of painting the globe. The globe is partially painted, showing continents and oceans. The overall scene is illuminated with a blue light, creating a cosmic and artistic atmosphere.

WAHRNEHMUNG UNSERE INNEREN UNIVERSEN

Fortlaufend stellt unser Gehirn Vermutungen über die Welt da draußen an und gleicht Sinneseindrücke ab. Damit konstruiert es die Realität, die wir wahrnehmen, als eine Art kontrollierte Halluzination.



Anil K. Seth ist Professor für Kognitionsforschung und Computerneurowissenschaft sowie Kodirektor des Sackler Centre for Consciousness Science der University of Sussex in Chichester (Großbritannien). Im Mittelpunkt

seiner Forschung stehen die biologischen Grundlagen des Bewusstseins.

► spektrum.de/artikel/1693094

»Wir sehen die Dinge nicht, wie sie sind; wir sehen sie so, wie wir sind«

Anais Nin (1903–1977)

Am 10. April 2019 saßen Papst Franziskus, der südsudanesische Präsident Salva Kiir Mayardit sowie der frühere Rebellenführer Riek Machar im Vatikan zusammen beim Abendessen. Sie speisten schweigend. Es war der Beginn einer zweitägigen Klausur. Ihr Ziel: die Versöhnung nach einem Bürgerkrieg, in dem seit 2013 rund 400 000 Menschen ums Leben gekommen waren.

Ungefähr zur gleichen Zeit bereitete mein Doktorand Alberto Mariola ein neues Experiment vor. Sein Ziel: Versuchspersonen sollten erleben, wie sie in einem Zimmer saßen, das es in Wirklichkeit so nicht gab.

Mancher Psychiatriepatient klagt, die Welt um ihn herum oder sogar sein eigenes Ich sei nicht mehr »real«. Was echt ist und was nicht, erscheint in unseren heutigen Gesellschaften zunehmend beliebig zu werden. Kriegsparteien nehmen unterschiedliche Realitäten wahr und glauben fest daran. Dann kann es helfen, schweigend zusammen zu essen, schafft man doch so ein kleines Stückchen gemeinsame Realität, auf das sich alle einigen können – eine stabile Plattform für die weitere Verständigung.

Grundlegend unterschiedliche innere Universen finden wir aber nicht nur bei Kriegen oder Psychosen. 2015 kursierte im Internet das schlecht belichtete Foto eines Kleids (siehe Weblink S. 24) und spaltete die Welt: Für die einen (darunter ich) war es blau und schwarz, für die anderen (darunter die Hälfte meiner Institutsbelegschaft) erschien es weiß und golden. Beide Seiten waren von ihrer Sichtweise vollkommen überzeugt und konnten sich schlicht nicht vorstellen, dass andere das nicht so sahen.

Wie leicht sich unsere Wahrnehmungssysteme austricksen lassen, wissen wir alle. Von dem Phänomen zeugen etwa die allseits beliebten optischen Täuschungen: Zwei Linien scheinen unterschiedlich lang zu sein. Wenn man allerdings nachmisst, erweisen sie sich als exakt gleich. Wir

**Unser Geist schafft sich unsere Realität.
Somit lebt jeder von uns in seiner
eigenen Welt, die sich von derjenigen der
Mitmenschen unterscheidet.**

AUF EINEN BLICK DAS GEHIRN KENNT KEINE OBJEKTIVE WIRKLICHKEIT

- 1 Die Realität, die wir wahrnehmen, ist kein unmittelbares Abbild der objektiven Außenwelt.
- 2 Wahrnehmung beruht vielmehr auf Vorhersagen, die das Gehirn über die Ursachen eintreffender Sinnes-signale anstellt.
- 3 Durch Abweichungen von diesen Prognosen korrigieren wir laufend unser Weltbild. Wahrnehmung beruht somit auf einer kontrollierten Halluzination.

sehen Bewegung in einem Bild, obwohl wir wissen, dass es stillsteht. Die übliche Erklärung für solche Täuschungen lautet: Sie nutzen Eigenheiten der Wahrnehmungsschaltkreise aus, und deshalb nehmen wir etwas wahr, was von der Realität abweicht. In dieser Begründung steckt jedoch die unausgesprochene Annahme, ein richtig funktionierendes System würde dem Bewusstsein die Dinge genau so präsentieren, wie sie wirklich sind.

Tatsächlich besitzen wir kein direktes Fenster zu einer objektiven Realität. Nehmen wir zum Beispiel das Erleben von Farbe – wie etwa das leuchtende Rot meiner Kaffeetasche. Ihre Farbe wirkt ebenso real wie ihre runde Form oder ihre Festigkeit. Solche Aspekte empfinden wir als objektive Eigenschaften der Welt, die von unseren Sinnen aufgenommen und unserem Geist durch die komplexen Mechanismen der Wahrnehmung kundgetan werden.

Andererseits wissen wir seit Isaac Newton, dass Farben in der Außenwelt eigentlich nicht existieren. Sie werden vielmehr vom Gehirn aus Mischungen farbloser elektromagnetischer Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen zusammengebraut. Farben sind ein kluger Trick der Evolution, denn damit kann der Organismus Oberflächen unter wechselnden Lichtverhältnissen besser im Auge behalten. Und wir Menschen registrieren nur einen winzigen Ausschnitt aus dem elektromagnetischen Spektrum, eingebettet zwischen Infrarot und Ultraviolett. Jede Farbe, die wir sehen, jeder Teil aus der Gesamtheit unserer einzelnen visuellen Welten entspringt diesem Schnipsel der Realität.

Damit können Wahrnehmungserlebnisse keine umfassende Wiedergabe einer objektiven Außenwelt darstellen. Sie sind einerseits weniger, andererseits aber auch mehr als das. Die Realität, die wir erleben – wie Dinge zu sein *scheinen* –, spiegelt nicht unmittelbar wider, was tatsächlich vorhanden ist. Es handelt sich vielmehr um eine Konstruktion des Gehirns für das Gehirn. Und wenn mein Gehirn anders ist als deins, dürfte auch meine Realität eine andere sein.

Im Höhlengleichnis des griechischen Philosophen Platon (um 427–347 v. Chr.) sind Gefangene ihr ganzes Leben lang vor einer Wand gefesselt und sehen nur das Schattenspiel der Objekte, die sich an einem Feuer hinter ihnen bewegen.

Den Schatten geben sie Namen, weil sie diese für real halten. Gut ein Jahrtausend später schrieb der arabische Gelehrte Alhazen (um 965–1040), die Wahrnehmung im Hier und Jetzt entspringe nicht einem unmittelbaren Zugang zu einer objektiven Realität, sondern hänge von Prozessen des »Urteilens und Schließens« ab. Nochmals einige Jahrhunderte danach argumentierte Immanuel Kant (1724–1804), das Chaos der uneingeschränkten sensorischen Eindrücke bleibe immer sinnlos, wenn es nicht durch bereits vorhandene Vorstellungen oder »Überzeugungen« eine Struktur erhalte, einschließlich vorgegebener Rahmen wie dem von Raum und Zeit. Kant verwies auf das »Ding an sich«, eine objektive Realität, die der menschlichen Wahrnehmung immer unzugänglich bleiben werde.

Diese Ideen gewinnen heute neuen Auftrieb auf Grund einflussreicher Theorien, laut denen das Gehirn wie eine Art Vorhersagemaschine funktioniert. Demnach beruht die Wahrnehmung der Welt – und des Ichs in ihr – auf einem Prozess der neurobiologischen Vorhersage über die Ursachen sensorischer Signale. Zurückgeführt werden solche Theorien in der Regel auf den deutschen Physiker und Physiologen Hermann von Helmholtz (1821–1894), der Wahrnehmung als einen Prozess der unbewussten Rückschlüsse betrachtete. Gegen Ende des 20. Jahrhunderts griffen Kognitionsforscher sowie Experten für künstliche Intelligenz Helmholtz' Gedanken wieder auf und prägten Begriffe wie prädiktive Codierung (predictive coding) und prädiktive Verarbeitung (predictive processing).

Das Gehirn entwickelt und aktualisiert plausible Hypothesen über die Sinneseindrücke

Nach dieser Vorstellung versucht das Gehirn festzustellen, was in der Welt draußen oder im Körperinneren vorgeht, indem es ständig möglichst plausible Hypothesen über die Ursachen seiner sensorischen Eindrücke aufstellt und aktualisiert. Hierfür kombiniert es frühere Erwartungen oder »Überzeugungen« über die Welt mit den neu hinzukommenden sensorischen Daten und berücksichtigt dabei auch die Zuverlässigkeit der Signale. Wissenschaftler formulieren diesen Prozess in der Regel mit Hilfe der bayesschen Statistik, die Vermutungen mit neuen Daten optimiert.

Dabei macht das Gehirn laufend Vorhersagen über sensorische Signale und vergleicht sie mit denen, die über Augen und Ohren sowie über die Nase, die Fingerspitzen und alle weiteren sensorischen Kanäle eintreffen. Aus den Unterschieden zwischen vorhergesagtem und tatsächlichem Input resultiert der »Vorhersagefehler«, mit dem das Gehirn die Prognosen aktualisiert und sich auf die nächste Runde vorbereitet. Dabei versucht es stets, die Abweichung so niedrig wie möglich zu halten. Die daraus entstehende plausible Vermutung ist das, was wir letztlich wahrnehmen.

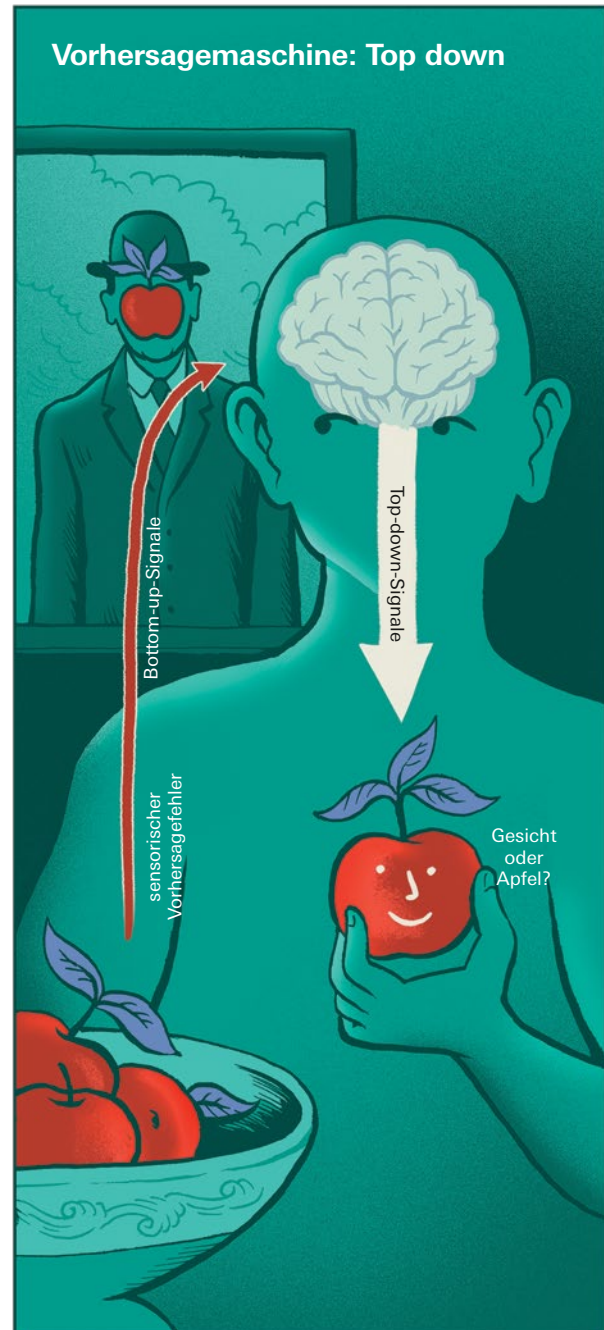
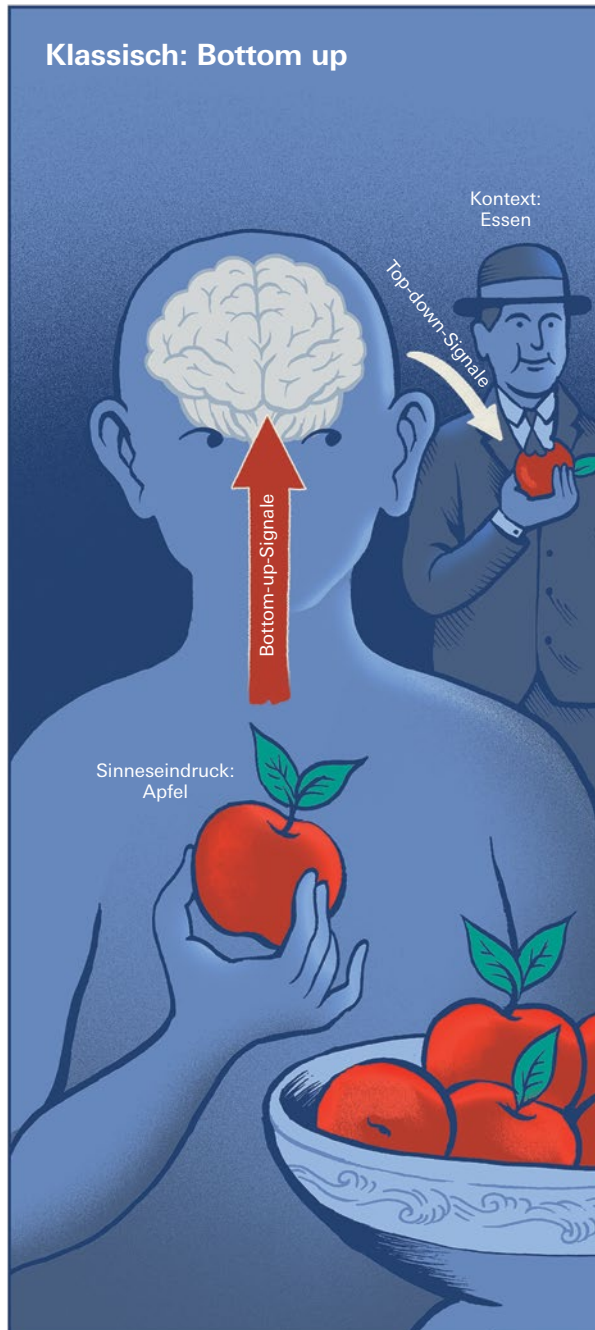
Um zu verstehen, wie dramatisch eine solche Sichtweise unsere intuitiven Vorstellungen von den neurobiologischen Grundlagen der Wahrnehmung auf den Kopf stellt, muss man sich die Richtung der Signalströme im Gehirn vergegenwärtigen: Wenn wir die Wahrnehmung für ein direktes Fenster zu einer äußeren Realität halten, erscheint es logisch, dass Informationen von den Sinnesorganen zum Gehirn fließen, also von unten nach oben (»bottom up«).

Die Ursprünge der Wahrnehmung

Nach klassischer Vorstellung (links) funktioniert die Wahrnehmung als direktes Fenster zur äußeren Realität. Augen, Ohren, Nase, Zunge und Haut senden ihre Sinnessignale von unten nach oben (»bottom up«) zum Gehirn und präsentieren uns die Außenwelt, wie sie ist. Umgekehrt

fließende Signale dienen nur dazu, das Wahrgenommene zu verfeinern. Im Gegensatz dazu beruht nach der Theorie der Vorhersagemaschine (rechts) die Wahrnehmung auf von oben nach unten (»top down«) gerichteten Prognosen, die das Gehirn auf der Grund-

lage früherer Erfahrungen anstellt. Aus den einströmenden Sinnessignalen ermittelt das Gehirn Unterschiede zur Vorhersage, den Vorhersagefehler, die dann in neue Hypothesen eingehen. Demnach entsteht Wahrnehmung aus einer kontrollierten Halluzination.



Umgekehrt gerichtete Signale könnten lediglich Zusammenhänge oder Verfeinerungen des Wahrgenommenen beisteuern – mehr nicht. In einer solchen Sichtweise scheint es, als offenbare sich die Welt uns unmittelbar durch unsere Sinne.

Ganz anders das Szenario der Vorhersagemaschine: Hier erfolgt der Hauptteil der Wahrnehmungstätigkeit durch von oben nach unten gerichtete Signale (»top down«), die Vorhersagen über die Wahrnehmung liefern. Der zum Gehirn gerichtete Strom der Sinneseindrücke dient nur dazu, diese Prognosen zu verfeinern und angemessen mit ihren realen Ursachen zu verbinden. Somit beruht unsere Wahrnehmung mindestens so stark auf einem zur Peripherie gerichteten Informationsfluss wie umgekehrt, wenn nicht noch stärker. Es handelt sich also nicht um ein passives Aufnehmen einer äußeren, objektiven Realität, sondern um einen aktiven Konstruktionsprozess – eine kontrollierte Halluzination (siehe »Die Ursprünge der Wahrnehmung«, S. 21).

Beim Wort Halluzination denkt man meist an Sinneseindrücke, die in klarem Widerspruch zur realitätstreuen normalen Wahrnehmung stehen. Die Theorie der Vorhersagemaschine geht dagegen von einem kontinuierlichen Übergang zwischen Halluzination und normaler Wahrnehmung aus. Beide beruhen auf der Interaktion zwischen den Top-down-Prognosen des Gehirns und den Bottom-up-Signalen der Sinnesorgane, aber während einer Halluzination ist diese Verknüpfung gestört. Was wir so nennen, erweist sich als eine Art unkontrollierter Wahrnehmung.

Daraus folgt keineswegs, dass nichts real wäre. Der englische Philosoph John Locke (1632–1704) unterschied

bereits im 17. Jahrhundert zwischen »primären« und »sekundären« Qualitäten. Die primären Qualitäten eines Objekts wie seine Festigkeit oder der Raum, den es einnimmt, existieren unabhängig von demjenigen, der sie wahrnimmt. Sekundäre Qualitäten – wie etwa Farbe – gibt es dagegen nur durch den Betrachter. Daher bedeutet die Interpretation der Wahrnehmung als kontrollierte Halluzination nicht, dass es klug wäre, vor einen Bus zu springen. Der Bus besitzt unabhängig von unserem Wahrnehmungsapparat die primären Qualitäten der Festigkeit und räumlichen Ausdehnung, die uns verletzen können. Die kontrollierte Halluzination ist also nicht der Bus als solcher, sondern die Art, wie er uns erscheint.

Scheinbar sinnlose Flecken

Immer mehr Befunde bestätigen mittlerweile die These von der kontrollierten Halluzination. Betrachten Sie einmal das Bild rechts unten! Vermutlich erkennen Sie nur eine Ansammlung schwarzer und weißer Flecken. Nun blättern Sie zum Foto auf S. 24, und gehen Sie dann zurück zu S. 23! Jetzt sieht das erste Bild für Sie wahrscheinlich anders aus: Wo zuvor nur ein Durcheinander von Flecken erschien, sind nun abgegrenzte Objekte zu erkennen.

Bemerkenswerterweise haben sich die von den Augen aufgenommenen Sinnessignale beim zweiten Betrachten des Bilds überhaupt nicht verändert. Verändert haben sich lediglich die Vorhersagen des Gehirns über die Ursachen der Sinnessignale. Indem Sie eine neue Wahrnehmungserwartung auf höherem Niveau gewonnen haben, sehen Sie bewusst etwas anderes als zuvor.

Kurz erklärt: Das Theorem des Thomas Bayes

Als Reverend Thomas Bayes 1761 in der südenglischen Stadt Tunbridge Wells starb, ahnte niemand, dass einmal eine berühmte mathematische Methode nach ihm benannt werden würde. Der Aufsatz, in dem er ein Problem aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung löste, wurde erst Jahre nach seinem Tod veröffentlicht. Rund 200 Jahre später entwickelten Mathematiker daraus das, was man heute »bayesianische Statistik« nennt.

Die Wahrscheinlichkeitstheorie entstand historisch aus der Beschäftigung mit Glücksspielen. Viele spielbegeisterte (oder spiel-süchtige) Fürsten beauftragten Mathematiker mit der Lösung von Problemen am Spieltisch. Auch Thomas Bayes befasste sich damit,

etwa in Form dieser Aufgabe: Ein Mann beobachtet eine Lotterie, in der kontinuierlich Gewinne gezogen werden, aber die Wahrscheinlichkeit eines Gewinns ist unbekannt. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass x Prozent aller Lose gewinnen (in der Formel rechts: A), wenn bei den bisherigen Ziehungen y Prozent Gewinne waren (B)?

Dieses Problem lässt sich theoretisch lösen, indem man umgekehrt die Wahrscheinlichkeit betrachtet, dass y Prozent Gewinne aufgetreten wären, wenn x Prozent aller Lose Gewinnlose sind ($B|A$). Der entscheidende Dreh ist, bedingte Wahrscheinlichkeiten zu berechnen (etwa die von A vorausgesetzt, dass B), was Statistiker als vertikalen Strich darstellen ($A|B$). In

der heutigen Form lautet Bayes' Theorem:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) P(A)}{P(B)}$$

Die bayesianische Statistik lässt also Vorwissen in die Berechnung einfließen. Um etwa die mittlere Schuhgröße in der Bevölkerung zu bestimmen, könnte man die Füße von 100 Personen ausmessen. Dabei kann jedoch zufällig auch ein extremer Wert herauskommen, etwa eine mittlere Schuhgröße bei Männern von 48, was eher unplausibel ist. Um dies zu vermeiden, sollte man Vorwissen berücksichtigen – zum Beispiel Messungen aus den letzten Jahren. Bayes' Theorem kalkuliert dieses Wissen mit ein.

Man kann Menschen dazu bringen, eine unwirkliche Umgebung so zu erleben, als wäre sie real

Forscher um Christoph Teufel von der britischen Cardiff University testeten damit Patienten, die im Frühstadium einer Psychose zu Halluzinationen neigten. Wie sich zeigte, erkennen diese Personen, nachdem sie mehrfach die vollständigen Abbildungen gesehen hatten, besser als gesunde Kontrollprobanden, was sich hinter solchen Zweitbildern verbirgt. Mit anderen Worten: Die Neigung zu Halluzinationen wirkt sich auf die Wahrnehmung aus. Genau das ist zu erwarten, wenn psychotische Halluzinationen durch eine zu starke Gewichtung der Prognosen des Gehirns ausgelöst werden, so dass sie dominieren und die Wahrnehmung von ihren äußeren Ursachen entkoppeln.

Mit einem simplen Versuchsaufbau lösten Philip Corlett von der Yale University in New Haven (USA) und seine Kollegen Halluzinationen aus: Ihre Probanden sahen zunächst einen Lichtreiz, wobei gleichzeitig ein Ton erklang. Nach einigen Durchgängen glaubten die Versuchspersonen den Ton zu hören, wenn nur das Licht aufleuchtete. Wie bildgebende Verfahren dabei offenbarten, sind an dieser prädiktiven Wahrnehmung bestimmte Hirnareale wie der tief im Schläfenlappen liegende Sulcus temporalis superior beteiligt, der spezifisch die Top-down-Vorhersagen mit akustischen Signalen koppelt.

Statt Hirnaktivitäten zu untersuchen, simulieren wir in meinem Institut an der University of Sussex verschobene Wahrnehmungsprioritäten mittels virtueller Realität (VR). Keisuke Suzuki konstruierte dafür eine »Halluzinationsmaschine«: Mit einer 360-Grad-Kamera filmten wir zunächst an einem Dienstagmittag einen belebten Platz auf dem Unigelände. Die Aufnahmen verarbeiteten wir dann mit einem Algorithmus auf der Grundlage des Programms »DeepDream«. Dabei wird der Lernprozess eines künstlichen neuronalen Netzes – eines der Arbeitspferde der künstlichen Intelligenz – quasi umgedreht. Unser Netzwerk war darauf trainiert, Gegenstände auf Bildern zu erkennen; wenn es jedoch mehrfach rückwärtsläuft und somit statt des Outputs den Input aktualisiert, projiziert es die Dinge auf das Bild, von denen es »glaubt«, sie seien dort. Die Vorhersagen gewinnen gegenüber den einlaufenden Daten die Oberhand und lassen das Gleichgewicht der Wahrnehmungsvermutungen in Richtung dieser Prognosen kippen. Unser Netzwerk konnte insbesondere verschiedene Hunderrassen erkennen; und so tauchten in dem Video plötzlich überall Hunde auf. Versuchspersonen, die sich solche verarbeiteten Aufnahmen mit einem VR-Headset ansahen, kamen sich vor wie auf einem psychedelischen Trip.

Mit der Halluzinationsmaschine konnten wir zudem ganz unterschiedliche Erlebnisse erzeugen. Ließen wir beispielsweise das neuronale Netz nicht von der Output-Schicht,

sondern von einer seiner mittleren Schichten aus rückwärtslaufen, glaubten die Probanden, statt ganzer Objekte nur Teile davon zu sehen.

Das ist sicherlich beeindruckend, allerdings merkt jeder, dass das Erlebte nicht echt ist, denn trotz ausgeklügelter Computergrafiken liefert derzeit kein VR-Umfeld ein so überzeugendes Erlebnis, dass es nicht von der Realität zu unterscheiden wäre. Dieser Herausforderung stellen wir uns inzwischen mittels einer neuen Einrichtung zur »Ersatzrealität«. Anfang 2019, just als Papst Franziskus mit Salva Kiir Mayardit und Riek Machar in Klausur ging, entwickelten wir ein System, in dem Versuchspersonen eine Umwelt als real erleben – und sie für real halten –, obwohl sie das in Wirklichkeit nicht ist.

Das irrealer Zimmer

Dahinter steckt ein einfacher Trick: Wir machen wieder Panoramaaufnahmen, diesmal allerdings im Innern unseres Labors. Wir bitten unsere Versuchspersonen, auf einem Schemel in der Mitte des Raums Platz zu nehmen und ein VR-Headset aufzusetzen, in das vorne eine Kamera eingebaut ist. Die Probanden sollen sich damit im Zimmer umschauen. Aber ohne es ihnen zu sagen, schalten wir irgendwann um, so dass das Headset jetzt statt der echten Szene das zuvor aufgenommene Panoramavideo zeigt. Die meisten Menschen erleben das Gesehene weiterhin als real, obwohl es sich um eine vorproduzierte Aufnahme handelt.

Offensichtlich kann man Menschen dazu bringen, eine unwirkliche Umgebung so zu erleben, als wäre sie vollständig real. Allein diese Erkenntnis eröffnet Neuland für die VR-Forschung: Wir können ausprobieren, wo die Grenzen dessen liegen, was Menschen als real erleben und für echt halten. Außerdem können wir erkunden, wie sich das Erlebnis, Dinge für real zu halten, auf andere Aspekte der Wahrnehmung auswirkt.

Die Idee, die Welt unseres Erlebens sei nicht real, taucht immer wieder in Philosophie und Sciencefiction, aber auch bei manch nächtlichem Stammtischgespräch auf. Im

Dieses Zweitbild erscheint wie ein Durcheinander aus schwarzen und weißen Flecken. Jetzt blättern Sie bitte um!

GETTY IMAGES / EYEEM / RICHARD ARMSTRONG; BARRETTUM; SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2019





GETTYIMAGES/EYEEM/RICHARD ARMSTRONG

Wenn Sie dieses Foto betrachten und dann wieder zurückblättern, werden Sie auf dem Zweitonbild auf S. 23 etwas erkennen.

Spielfilm »Matrix« schluckt der Held Neo eine rote Pille und erkennt, dass alles, was er für real gehalten hat, eine raffinierte Simulation ist, während er in Wirklichkeit in einer Art Brutkasten liegt und intelligenten Maschinen als Energiequelle dient. Der schwedische Philosoph Nick Bostrom von der University of Oxford schloss aus statistischen Berechnungen, wir könnten in einer Computersimulation leben, die aus einem postmenschlichen Zeitalter stammt. Ich stimme seiner Argumentation nicht zu, setzt sie doch voraus, dass sich Bewusstsein simulieren lässt – wovon man meiner Meinung nach nicht mit Sicherheit ausgehen kann –, die Vorstellung macht allerdings schon nachdenklich.

Solche Gedankenspiele mögen zwar reizvoll sein, bringen uns aber nicht viel weiter. Beschränken wir uns auf die Erkenntnis: Unsere Wahrnehmungswelt besteht aus kontrollierten Halluzinationen, mit denen das Gehirn Vermutungen über die letztlich unergründlichen Ursachen der sensorischen Signale aufstellt. Und die meisten von uns erleben solche kontrollierten Halluzinationen als real – allerdings nicht immer. Manche Menschen mit dissoziativen Störungen empfinden ihre wahrgenommene Welt oder sogar ihr eigenes Ich als unreal. Durch psychedelische Substanzen ausgelöste Wahnvorstellungen verbinden ein Gefühl der Unwirklichkeit mit lebhafter Wahrnehmung; das Gleiche gilt für so genannte Klarträume. Synästhetiker kombinieren ihre sinnlichen Erfahrungen; beim Anblick von schwarzer Schrift auf einem weißen Blatt Papier erkennen manche beispielsweise Farben, die sie als nicht real empfinden. Selbst in der normalen Wahrnehmung sehen wir etwa nach einem direkten Blick in eine Lampe das unwirklich erscheinende Nachbild auf der Netzhaut. Somit gibt es zahlreiche Fälle, bei denen wir unseren Augen nicht trauen.

Für mich bedeutet das, dass wir die empfundene Realität nicht für gegeben halten sollten. Sie stellt nur einen Aspekt dar, mit dem unser Gehirn seine bayesschen Vermutungen über die Ursachen von Sinneseindrücken anstellt. Doch

wozu das Ganze? Vielleicht lautet die Antwort: Eine plausible Annahme über die Welt, die der Realität möglichst nahekommt, ist für unser Dasein sinnvoller als eine, die das nicht tut. Wir verhalten uns beim Anblick einer Kaffeetasse, eines heranfahrenden Busses oder unseres Partners eher angemessen, wenn wir diese als real existierend erleben.

Eine Fülle verschiedener Realitäten

Das Ganze hat auch eine Kehrseite. Sie zeigt sich an der optischen Täuschung mit dem Kleid: Wenn wir Dinge als real erleben, können wir schlecht einschätzen, ob unsere wahrgenommene Welt von den Welten anderer abweicht. Solche Unterschiede mögen zunächst gering sein; sie können sich jedoch festsetzen und verstärken, wenn wir immer mehr unterschiedliche Informationen aufnehmen, die am besten mit unseren individuellen Weltbildern übereinstimmen, um mit Hilfe solch einseitiger Daten unsere Modelle zu aktualisieren. Wir alle kennen diesen Prozess aus den Filterblasen der sozialen Medien und den von uns gelesenen Zeitungen. Ich glaube, dass die gleichen Prinzipien genauso auf einer tieferen Ebene unterhalb unserer gesellschaftlich-politischen Überzeugungen gelten, bis hin zu unserer wahrgenommenen Realität. Sie gelten wahrscheinlich sogar für unsere Selbstwahrnehmung – für die Empfindung, ich zu sein –, denn auch das Ich-Erlebnis stellt seinerseits eine Wahrnehmung dar.

Damit bekommen die konstruktiven, kreativen Wahrnehmungsmechanismen eine unerwartete gesellschaftliche Relevanz. Wenn wir die Fülle der erlebten Realitäten, die sich auf die Milliarden Gehirne auf unserem Planeten verteilen, besser einschätzen können, finden wir vielleicht eine Basis, auf der sich ein gemeinsames Verständnis und eine bessere Zukunft aufbauen lassen – ob zwischen Bürgerkriegsgegnern, zwischen Anhängern verschiedener politischer Parteien oder zwischen zwei Menschen, die zusammen wohnen und Geschirr spülen müssen. ◀

QUELLEN

Corlett, P. R. et al.: Hallucinations and strong priors. *Trends in Cognitive Sciences* 23, 2019

Powers, A. R. et al.: Pavlovian conditioning-induced hallucinations result from overweighting of perceptual priors. *Science* 357, 2017

Seth, A. K., Tsakiris, M.: Being a beast machine: the somatic basis of selfhood. *Trends in Cognitive Sciences* 22, 2018

Suzuki, K. et al.: A deep-dream virtual reality platform for studying altered perceptual phenomenology. *Scientific Reports* 7, 2017

Teufel, C. et al.: Shift toward prior knowledge confers a perceptual advantage in early psychosis and psychosis-prone healthy individuals. *PNAS* 112, 2015

WEBLINK

www.tagesspiegel.de/gesellschaft/panorama/dressgate-die-farbe-des-kleides/11437560.html

Auf diesem schlecht belichteten Foto sieht das Kleid für manche Menschen blau und schwarz aus, anderen erscheint es weiß und golden.



Georg von Holtzbrinck Preis für Wissenschaftsjournalismus

AUSSCHREIBUNG 2020

Der Preis wurde von der Verlagsgruppe von Holtzbrinck 1995 anlässlich des 150-jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten.

Die eingereichten Arbeiten sollen allgemeinverständlich sein und zur Popularisierung von Wissenschaft und Forschung, insbesondere in den Bereichen Naturwissenschaften, Technologie und Medizin, beitragen.

Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Text (Wortbeiträge Print und Online) und ein Preis in der Kategorie Elektronische Medien (TV, Hörfunk und Multimedia) sowie ein Nachwuchspreis (Jahrgang 1991 oder jünger) vergeben.

Der Preis in den Kategorien Text und Elektronische Medien ist mit je 10.000 Euro dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 5.000 Euro dotiert. Bewerben Sie sich bis zum 1. April 2020 mit 3 Beiträgen (Text) bzw. 2–3 Beiträgen (Elektronische Medien) aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis.

KONTAKT

**Veranstaltungsforum
Holtzbrinck Publishing Group**

Torstraße 42, 10119 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20

Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de

www.vf-holtzbrinck.de

Die Auswahl erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Eine Shortlist mit den Nominierten wird vor der Bekanntgabe der Preisträgerinnen und Preisträger auf der Webpage veröffentlicht. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (VORSITZ)

Vorsitzender der Geschäftsführung,
Holtzbrinck Publishing Group

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER

Mitglied des Gesellschafterausschusses,
Boehringer Ingelheim

ULRICH BLUMENTHAL

Redakteur „Forschung aktuell“, Deutschlandfunk

PROF. DR. ANTJE BOËTIUS

Direktorin, Alfred-Wegener-Institut,
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)

PROF. DR. MARTINA BROCKMEIER

Vorsitzende, Wissenschaftsrat

PROF. DR.-ING. MATTHIAS KLEINER

Präsident, Leibniz-Gemeinschaft e.V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER

Mitglied der Geschäftsführung, Klaus Tschira Stiftung gGmbH

JOACHIM MÜLLER-JUNG

Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER

Geschäftsführender Redakteur und Leiter Redaktion Wissen,
DIE ZEIT

RANGA YOGESHWAR

Publizist und Moderator ARD-Sendungen

INFORMATIK FORM VERSUS TEXTUR

Moderne Bilderkennungsprogramme funktionieren meist beeindruckend treffsicher. Doch manchmal unterlaufen ihnen peinliche Fehler. Das könnte daran liegen, dass sich die Algorithmen auf den Aufbau von Objekten statt auf deren Form konzentrieren.

► Eine der größten Stärken aktueller künstlicher Intelligenzen (KIs) ist das Klassifizieren von Bildern – einige übertreffen dabei sogar Menschen. Allerdings können gelegentlich kleinste Veränderungen diese Algorithmen aus dem Konzept bringen. Bearbeitet man etwa Bilder, so dass das Fell einer Katze getigert, gepunktet oder gefleckt erscheint, erkennen Menschen die Tiere in den meisten Fällen immer noch problemlos, während Maschinen völlig versagen.

Forscher von der Universität Tübingen haben nun die mögliche Ursache dafür entdeckt, wie sie auf der im Mai 2019 stattgefundenen International

Forscher veränderten Bilder von Hunden, indem sie deren Textur beispielsweise mit Uhren füllten.

Conference on Learning Representations (ICLR) erklärten: Während Menschen größtenteils auf die Form eines Objekts achten, fokussieren sich maschinell lernende Algorithmen auf ihre Textur. Dieses überraschende Ergebnis verdeutlicht, wie unterschiedlich Menschen und Maschinen Dinge »wahrnehmen«.

Damit ein Deep-Learning-Algorithmus zuverlässig funktioniert, braucht er enorm viele Beispieldaten. Man zeigt einem neuronalen Netz etwa Tausende von Tierbildern mit der dazugehörigen Bezeichnung »Bild zeigt eine Katze« oder »Bild zeigt keine Katze«. Es sucht in den Daten daraufhin nach Mustern, anhand derer es sie klassifizieren kann. Die Netzwerke sind dabei an das visuelle System des Menschen angelehnt: Sie bestehen aus mehreren verbundenen Schichten

künstlicher Neurone, die in tieferen Lagen immer abstraktere Merkmale eines Bilds extrahieren. Nach der Trainingsphase ist das Programm in der Lage, Bilder zu beschriften, die es noch nie zuvor gesehen hat. Doch was genau zur richtigen Antwort führt – und woran es andererseits scheitern kann –, wissen Computerwissenschaftler nicht. Meist können sie erst nachträglich versuchen, die komplizierten Vorgänge innerhalb der Systeme nachzuvollziehen.

Dazu untersuchen Forscher unter anderem, wie Netzwerke auf bearbeitete Bilder reagieren. Zum Beispiel trainierten Matthias Bethge und Felix Wichmann 2018 mit ihrer Arbeitsgruppe von der Universität Tübingen ein neuronales Netzwerk so lange, bis es Bilder teilweise besser klassifizieren konnte als ein Mensch. Als sie die Bilder jedoch veräuschten, versagte das Netzwerk plötzlich.

Bilder mit seltsamen Eigenschaften

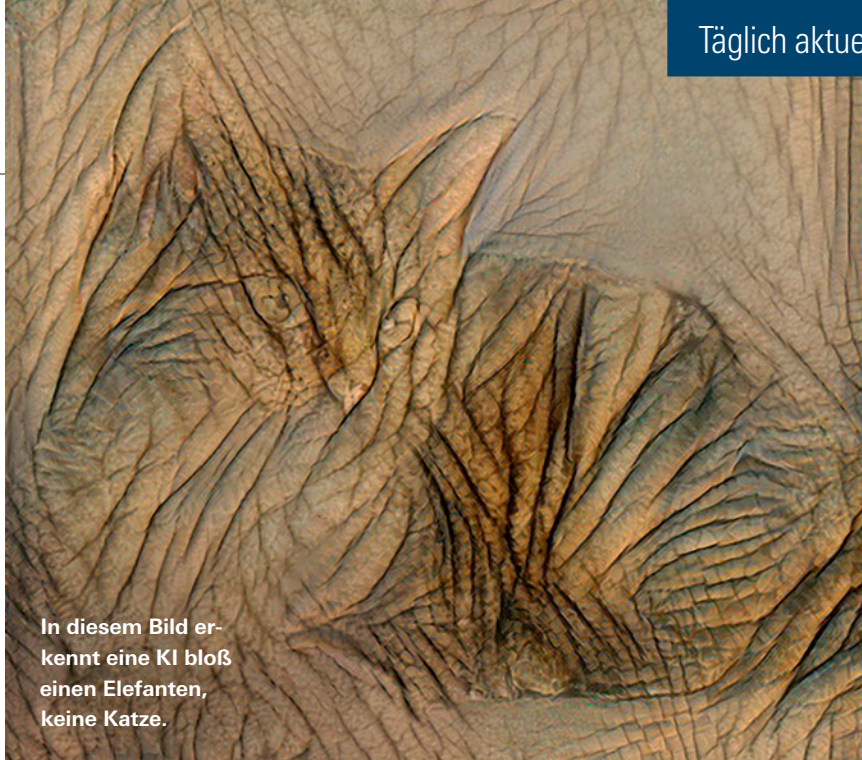
Den Forschern fiel auf, dass sich in diesen Fällen die Textur der Objekte am stärksten gewandelt hatten. »Die Form bleibt mehr oder weniger intakt, wenn man Rauschen hinzufügt«, erklärt Robert Geirhos, ein Doktorand von Wichmann und Bethge. »Die lokale Struktur, zu der etwa die Textur eines Objekts gehört, verzerrt sich dagegen sehr schnell.« Es schien, als hingen die Ergebnisse der KIs stark von diesen lokalen Merkmalen ab.

Um ihren Verdacht zu testen, erstellten Geirhos und sein Team Bilder mit widersprüchlichen Eigenschaften, indem sie die Form eines Objekts mit der Textur eines anderen paarten: etwa die Silhouette einer Katze mit einer rissigen grauen Elefantenhaut, ein Bär aus Glasflaschen oder die Kontur eines Hundes, das mit Zifferblättern gefüllt ist. Als sie verschiedenen Personen Hunderte dieser Bilder zeigten, kategorisierten Menschen sie meist gemäß ihrer Form – Katze, Bär, Hund. Die vier Algorithmen, denen sie die gleichen Bilder vorsetzten, benannten sie dagegen nach ihren Texturen: Elefant, Flasche, Uhr.

So merkwürdig die Vorliebe von Maschinen für Texturen erscheinen



MIT FELD: GERN VON ROBERT GEIRHOS, UNIVERSITÄT TÜBINGEN



In diesem Bild erkennt eine KI bloß einen Elefanten, keine Katze.

MIT FRIEDRICH VON ROBERT GEIRHOS, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

mag, ist sie bei genauerem Hinsehen schlüssig. Immerhin enthalten Bilder viel mehr Pixel mit Texturinformationen als solche, die ein Objekt begrenzen und dessen Form festlegen.

Wie die Forscher zeigten, kommen neuronale Netze sogar ganz ohne globale Information über die Form aus; ihnen genügen die lokalen Eigenschaften. Um das näher zu untersuchen, entwickelten die Informatiker ein neuronales Netz, das jenen überholten Klassifikationsprogrammen gleicht, die man vor dem maschinellen Lernen nutzte. Ihr Programm teilt – wie aktuelle KIs auch – ein Bild in winzige Ausschnitte auf. Aber statt die Informationen nach und nach zusammenzuführen, beurteilt es sofort, was die

Ein Bär oder Flaschen – was sehen Sie in diesem Bild?



MIT FRIEDRICH VON ROBERT GEIRHOS, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

jeweiligen Teile zeigen könnten. Wenn die Mehrheit der Ausschnitte beispielsweise auf eine Ente hindeuten, klassifiziert der Algorithmus das gesamte Objekt im Bild als Ente. Dabei beachtet er nicht, wie die einzelnen Elemente räumlich zusammenhängen. Selbst wenn das Programm der Forscher viel rudimentärer ist als eine KI, funktioniert es erstaunlich gut.

»Das stellt die Annahme in Frage, wonach sich maschinelles Lernen grundlegend von älteren Methoden unterscheidet«, sagt der Informatiker Wieland Brendel, ebenfalls an der Uni Tübingen. »Vielleicht sind die Fortschritte doch nicht so groß, wie einige Leute gehofft haben.« Laut Amir Rosenfeld von der York University gibt es »große Unterschiede zwischen dem, was Netzwerke unserer Meinung nach tun, und dem, was sie tatsächlich machen«.

Geirhos und seine Kollegen wollten daraufhin herausfinden, ob sie KIs zwingen können, die Textur eines Objekts zu ignorieren. Dazu trainierten sie die Programme nicht bloß mit gewöhnlichen Bildern, sondern färbten die abgebildeten Objekte zudem in verschiedenen Stilen ein. Und tatsächlich: Die Deep-Learning-Modelle konzentrierten sich plötzlich auf globale Merkmale und berücksichtigten vermehrt die Form.

Nach einem solchen Training konnten die Algorithmen auch verrauschte Bilder besser erkennen, selbst wenn

sie nicht gelernt hatten, mit derartigen Verzerrungen umzugehen. Das könnte erklären, warum Menschen Dinge eher nach ihrer Form identifizieren. Schließlich ist es wichtig für uns, Objekte unter verschiedensten Bedingungen zu erkennen, etwa wenn sie in weiter Ferne liegen oder von etwas anderem bedeckt werden. Indem man sich auf Umrisse konzentriert, macht man weniger Fehler. Außerdem verfügen Menschen noch über andere Sinne und können Texturen etwa ertasten. Daher erscheint es nachvollziehbar, dass unser visuelles System verstärkt auf Formen achtet.

Die Ergebnisse der Informatiker verdeutlichen einmal mehr, wie entscheidend die Auswahl geeigneter Trainingsdaten ist, um zuverlässige Algorithmen zu entwickeln. Gesichtserkennungsprogramme, automatisierte Software zur Selektion von Bewerbern und andere neuronale Netze haben sich häufig als »voreingenommen« erwiesen, weil man sie mit zu einseitigen Daten trainiert hat. Meist ist es schwer, solche Verzerrungen loszuwerden. Die Arbeit der Wissenschaftler zeigt aber, dass es grundsätzlich möglich ist. ◀

Jordana Cepelewicz gehört zum Autorenteam des »Quanta Magazine«.

QUELLEN

Brendel, W., Bethge, M.: Approximating CNNs with bag-of-local-features models works surprisingly well on ImageNet. International Conference on Learning Representations, 2019

Geirhos, R. et al.: ImageNet-trained CNNs are biased towards texture; increasing shape bias improves accuracy and robustness. International Conference on Learning Representations, 2019

Geirhos, R. et al.: Generalisation in humans and deep neural networks. Advances in Neural Information Processing Systems 31, 2018

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzt und bearbeitete Fassung des Artikels »Where We See Shapes, AI Sees Textures« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

 **Quanta** magazine

FESTKÖRPER DETEKTOREN FÜR DIE LÜCKE IM SPEKTRUM

Terahertzwellen waren nur mit großen Geräten nachzuweisen. Jetzt haben Physiker mit dem zweidimensionalen Material Graphen einen kompakten Empfänger gebaut.

Der Frequenzbereich der so genannten Terahertzstrahlung liegt zwischen der Infrarotstrahlung und den Mikrowellen. Lange Zeit gab es nur aufwändig herzustellende, teure Sender und Empfänger für diesen Teil des Spektrums. Forscher haben nun den Prototyp eines kompakten Terahertzdetektors entwickelt. Dieser besteht aus einem herkömmlichen Feldeffekttransistor mit einer leitenden Schicht aus Graphen. Bei weiteren Versuchen stellte sich heraus, dass sich dazu auch kommerzielles Graphen eignet. Dessen Struktur ist weniger perfekt, aber es lässt sich billiger und einfacher produzieren.

In Graphen ordnen sich Kohlenstoffatome in einem zweidimensionalen, hexagonalen Gitter an. Elektronen können äußerst widerstandsarm durch das Material fließen. Nach seiner Entdeckung 2004 sollte es als Ersatz für Silizium eine neue Mikroelektronik ermöglichen. Doch die Euphorie ließ in diesem Bereich bald nach, denn Graphen weist keine »Bandlücke« auf. Diese bestimmt, wie viel Energie man den Elektronen mitgeben muss, damit sie sich aus ihrem gebundenen Zustand von den Atomkernen lösen und das Material elektrischen Strom leitet. Darauf basiert die Funktionsweise von Transistoren. Allerdings kann Graphen im Fall von Terahertzwellen einen anderen Vorteil ausspielen: In dem Material werden die Ladungsträger von einem breiten Teil des Frequenzspektrums angeregt. Die Terahertzstrahlung kann mit ihrem elektromagnetischen Wechselfeld Elektronenwellen im Graphen auslösen, mit denen sie sich dann in Verbindung mit einem klassischen Transistor nachweisen lässt.

Terahertzstrahlung durchdringt viele Materialien wie Textilien oder Kunststoffe, wird aber von Wasser absorbiert und von Metallen reflektiert

(darum taucht sie gelegentlich im Kontext von »Nacktskannern« in den Medien auf). Außerdem ist sie nicht ionisierend, schädigt also kein Gewebe, und ist deshalb für Mediziner interessant, die sie in der Diagnostik einsetzen wollen. In der Werkstoffprüfung spielt sie bereits trotz der sperrigen und komplexen Sender und Empfänger eine wichtige Rolle. Auch für die Radioastronomie ist der Wellen-

längenbereich interessant: In dem Energiebereich zeigen viele Moleküle charakteristische Schwingungen und Übergänge zwischen Rotationszuständen.

Bisher funktioniert die Detektion von Terahertzwellen etwa mit so genannten Bolometern, welche die Strahlungsleistung in Wärme umwandeln. Das ändert dann den Widerstand messbar. Die dafür verwendeten

Terahertzstrahlen werden unter anderem in Ganzkörperscannern an Flughäfen eingesetzt.



BUBERNIES / GETTY IMAGES / ISTOCK

Bauteile sind aber meist sehr groß und müssen mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden.

2018 haben Forscher um Denis Bandurin an der University of Manchester in einer ersten Konzeptstudie einen Terahertzdetektor aus Graphen entwickelt. Dazu betteten sie zwei Lagen dieses Stoffs zwischen Kristalle aus Bornitrid und koppelten sie an eine Antenne. Eine Schicht aus reinem Graphen würde normalerweise nur einen sehr geringen Anteil der Terahertzstrahlung aufnehmen. Doch eingespermt im Kanal aus Bornitrid schaukelten sich die Elektronenwellen unter dem Wechselfeld der einfallenden Strahlung zu einer kollektiven Schwingung auf. Diese Resonanz zeigte sich deutlich in Form von Ausschlägen im Signal des Transistors – die Terahertzwellen ließen sich mit dem Detektor nachweisen. Die Leistung des Prototyps war bereits vergleichbar mit kommerziell erhältlichen Bolometern.

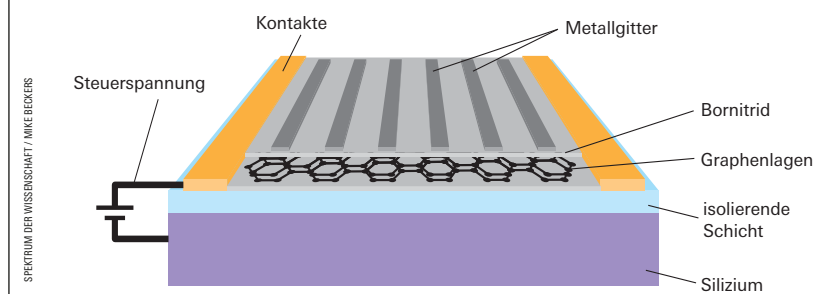
Wellen im Elektronenmeer

In dem bei diesen Versuchen verwendeten hochreinen Graphen können sich die Elektronen mühelos bewegen, aber seine Herstellung ist mit großem Aufwand verbunden. Einfacher lässt sich Graphen beispielsweise in einem Spezialofen produzieren. Dort zersetzt sich ein methanhaltiges Gasgemisch zu Wasserstoff und Kohlenstoff, und Letzterer scheidet sich als Graphen auf einem Metallsubstrat ab. Von diesem muss es dann mit Chemikalien gelöst werden. Bei den Vorgängen bilden sich zahlreiche Risse und Defekte. Die elektrische Leitfähigkeit von solchem kommerziellen Graphen ist geringer, da die Elektronenwellen an den fehlerhaften Stellen gestreut und stark gedämpft werden. Eigentlich dürfte sich kommerzielles Graphen deswegen nicht zum Nachweis von Terahertzstrahlung eignen.

Doch die Forscher um Andrei Bylinkin vom Moskauer Institut für Physik und Technologie lösten das Problem 2019 mit einem Konzept, das Physiker bereits Jahrzehnte zuvor theoretisch vorgeschlagen hatten. Dazu fixierten sie auf dem Transistor

Ein Transistor aus Graphen

Der zentrale Teil des Detektors ist eine Schicht aus Graphen. Eine Steuerspannung zwischen ihr und einer Lage aus dem Halbleiter Silizium – getrennt durch eine isolierende Schicht Siliziumdioxid – reguliert die Elektronendichte. Der Aufbau entspricht dem eines Feldeffekttransistors. Mit diesem lässt sich einfallende Terahertzstrahlung messen. Ein aufliegendes Metallgitter verhindert, dass die durch die Strahlung angeregten Elektronen im Graphen zu stark gestreut werden.



ein Metallgitter. Es fungiert gewissermaßen als Schleuse für die einfallende Terahertzstrahlung und kanalisiert ihr elektrisches Feld: Nur die Komponente, die senkrecht zu den Metallstäben auftrifft, regt die Elektronen zu einer Wellenbewegung in der Graphenebene an.

In ersten Tests, welche die Wissenschaftler mit Gleichstrom durchführten, wurden die Elektronen im kommerziellen Graphen wie zu erwarten stark an Defekten gestreut. Als die Forscher den Transistor dem Wechselfeld der Terahertzstrahlung aussetzten, konnten sie dennoch Resonanzen beobachten. Da das Metallgitter die einzelnen Pakete der Elektronenwelle nun stärker an einen Ort bindet, wandern die Teilchen weniger und werden nicht so stark gestreut. Die Rate, mit der die Elektronen auf Defekte stießen, war dadurch nur

noch etwa halb so groß wie für den Gleichstromfall.

Als das Team untersuchte, um welche Stellen die Elektronenwellen kreisten, befanden sich diese direkt unterhalb der Metallstäbe. Das konnten die Physiker mit einer Bindung der Elektronen an die Stäbe erklären, ähnlich wie geladene Teilchen in Kristallgittern vom Atomrumpf angezogen werden. Mit derart lokalisierten Wellen eignet sich selbst kommerzielles Graphen zur Konstruktion eines Transistors, der gegenüber Terahertzstrahlung empfindlich ist. Sollte sich die Konstruktion in weiteren Versuchen bewähren, dürfte das neue Einsatzzweck für den bislang so schlecht handhabbaren Wellenlängenbereich eröffnen. ◀

Stefan-Johannes Reich ist Physiker und Praktikant bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Bandurin, D.A. et al.: Resonant terahertz detection using graphene plasmons. *Nature Communications* 9, 2018

Bylinkin, A. et al.: Tight-binding terahertz plasmons in chemical-vapor-deposited graphene. *Physical Review Applied* 11, 2019

Das Metallgitter fungiert als Schleuse für die einfallende Terahertzstrahlung

KLIMAWANDEL HEUTE ERWÄRMT SICH DIE GANZE ERDE AUF EINMAL

Die aktuelle Aufheizung ist fast rund um den Globus zu beobachten. Damit unterscheidet sie sich grundsätzlich von anderen Temperaturschwankungen in den letzten 2000 Jahren, wie Klimarekonstruktionen zeigen.

In der Erdgeschichte gab es immer wieder Epochen, in denen es für längere Zeit wärmer, kälter, feuchter oder trockener wurde. Während der letzten 2000 Jahre waren dies vor allem die mittelalterliche Klimaanomale, eine warme, trockene Periode etwa von 950 bis 1250 n. Chr., sowie die kleine Eiszeit, eine kühle Phase vom 16. bis zum 19. Jahrhundert. Viele Menschen nehmen an, diese Phasen seien weltweit synchron verlaufen. Doch ein Team um Raphael Neukom von der Universität Bern hat 2019 gezeigt, dass sich diese und frühere Klimaepochen der vergangenen 2000 Jahre wesentlich kleinräumiger bemerkbar machten als die aktuelle, menschengemachte Erwärmung, die fast überall auf der Erde nachweisbar ist.

Da instrumentelle Temperaturmessungen für die gesamte Erde erst seit etwa 1850 vorliegen, rekonstruieren Fachleute das Klima in der Zeit davor mit Hilfe anderer Daten. So lässt sich beispielsweise an der Breite und Holzdicke der Jahresringe von Bäumen ablesen, wie die Sommertemperaturen von Jahr zu Jahr schwankten. Insbesondere die Klimabedingungen in kühlen Regionen wie der Arktis oder in Gebirgen lassen sich damit nachvollziehen. Korallen wiederum geben Aufschluss darüber, welche Temperaturen in der Vergangenheit in den Ozeanen herrschten: Denn sie bauen beim Wachsen Spurenelemente aus dem Umgebungswasser in ihre Skelette ein. Da die chemische Zusammensetzung des Meerwassers von seiner Temperatur abhängt, sind Korallen Zeugen für Schwankungen der Ozeantemperatur. Zu weiteren geologischen und biologischen Archi-

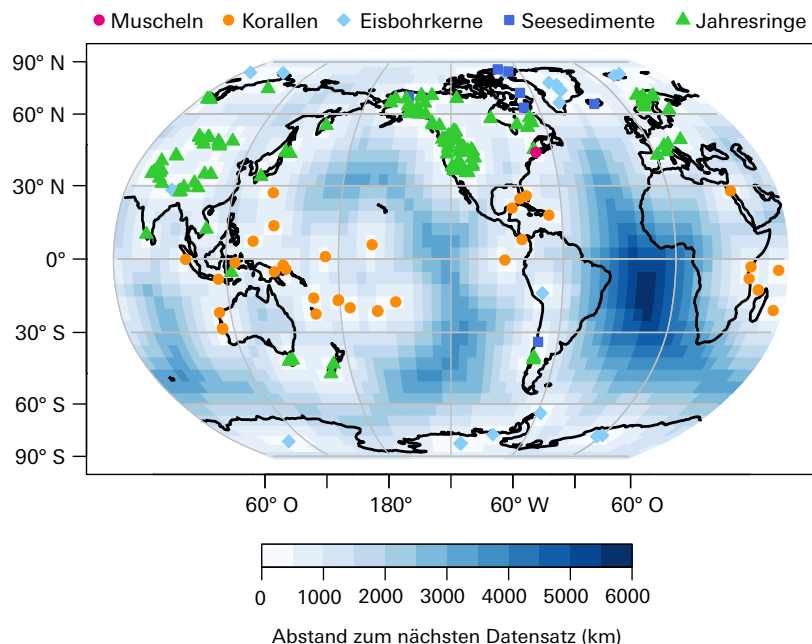
ven, deren Material, chemische Zusammensetzung oder Struktur Informationen über die Temperatur liefern, zählen Sedimente von Seen, Gletschereis und Muscheln. Auch die daraus gewonnenen Datensätze verraten, welche Temperaturen vor Jahrhunderten bis Jahrtausenden herrschten. Weil die so gewonnenen Informationen stellvertretend für Klimadaten stehen, bezeichnen Wissenschaftler sie als Proxydaten (englisch proxy: Stellvertreter).

Die Gruppe um Neukom rekonstruierte anhand dieser Hinweise die Oberflächentemperaturen der letzten 2000 Jahre für den gesamten Erdball im Detail. Grundlage ihrer Arbeit sind

Daten über ebendiese indirekten Anzeiger für die Temperatur, die das internationale Forschungskonsortium PAGES (Past Global Changes) zusammengetragen hat. Die von ihnen erstellte PAGES-2k-Datenbank enthält fast 700 Datenreihen, die auf der Analyse von Baumringen, Eisbohrkernen, Sedimenten, Korallen und Höhlenablagerungen basieren, außerdem auf urkundlichen Belegen und weiteren Archiven. Unter anderem dank der Vielzahl an Informationen konnten die Autoren die geografische Verbreitung ungewöhnlich warmer und kalter Temperaturen rund um den Globus aufs Jahr genau ermitteln.

Demnach war zwar die kleine Eiszeit die kälteste Epoche des letzten Jahrtausends, die tiefsten Temperaturen traten jedoch an verschiedenen Orten zu unterschiedlichen Zeiten auf (siehe Grafik S. 32). Zwei Fünftel der Erde erlebten die eisigste Kälte um die Mitte des 19. Jahrhunderts, andere Regionen bereits einige Jahrhunderte früher. Und selbst auf dem Höhepunkt der mittelalterlichen Klimaanomale wurden die Spitzentemperaturen nie auf mehr als 40 Prozent der Erdober-

Forscher haben das Erdklima der letzten 2000 Jahre im Detail rekonstruiert. Dazu haben sie fast 700 Datenreihen ausgewertet, die vergangene Temperaturen anzeigen, beispielsweise Korallen und Jahresringe von Bäumen.



NEUKOM, R. ET AL.: NO EVIDENCE FOR GLOBALLY COHERENT WARM AND COLD PERIODS OVER THE PREINDUSTRIAL COMMON ERA. NATURE 571, 2019, FIG. 1A. NUTZUNG GENEHMIGT VON SPRINGER NATURE / CCC

fläche gleichzeitig erreicht. Insofern ist die aktuelle globale Erwärmung einzigartig: Auf 98 Prozent der Erdoberfläche stellte das ausgehende 20. Jahrhundert die wärmste Phase der letzten 2000 Jahre dar. Den weiter fortschreitenden Temperaturanstieg zu Beginn des 21. Jahrhunderts haben die Autoren nicht berücksichtigt, da viele ihrer Proxydaten schon vor über zwei Jahrzehnten erhoben wurden.

Die Paläoklimatologen John Matthews und Keith Briffa warnten bereits 2005 davor, die kleine Eiszeit als »ununterbrochene, weltweit synchrone kalte Periode« zu begreifen. Neukom und sein Team stützen diese Auffassung jetzt mit ihren neuen Erkenntnissen. Unabhängig von der Wahl der statistischen Instrumente, welche die Proxydaten den entsprechenden Temperaturmessungen zuordneten, kamen die Forscher dabei zu den gleichen Ergebnissen – was

Grundlage der Arbeit sind fast 700 Datenreihen aus Klimaarchiven rund um die Welt

zeigt, dass ihre Schlussfolgerungen verlässlich sind.

Noch gibt es allerdings Grenzen bei der Interpretation der Proxydaten, die es erschweren, Warm- und Kaltphasen über die gesamten letzten zwei Jahrtausende hinweg miteinander zu vergleichen. Jahresringkalender, das am häufigsten genutzte Klimaproxy-Archiv in der von Neukoms Gruppe genutzten Datensammlung, können sehr langsame Klimaveränderungen über Jahrhunderte hinweg nur sehr unzuverlässig abbilden. Andere Hin-

weisgeber – vor allem Daten aus Meeres- und Seesedimenten – übertreiben wiederum Schwankungen, die sich innerhalb mehrerer Jahrzehnte bis zu etwa einem Jahrhundert abspielen.

Für wenige zehn Jahre umfassende Zeitrahmen können Fachleute jedoch sicherer beurteilen, wie und warum sich die Erde erwärmt oder abkühlt. In einer weiteren Veröffentlichung zeigten die Wissenschaftler, dass im vorindustriellen Zeitalter (1300–1800 n. Chr.) größere Vulkanausbrüche die Hauptursache für Umschwünge hin zu kalten Temperaturen waren, die dann einige Jahrzehnte lang anhielten. Veränderungen der Treibhausgaskonzentrationen hatten eine geringere, aber immer noch nachweisbare Wirkung. Das Team fand keine Anzeichen dafür, dass die Schwankungen der Sonneneinstrahlung die globale Durchschnittstemperatur über vergleichbare Zeiträume hinweg beeinflusst haben.



Die Spektrum-Schreibwerkstatt

Möchten Sie mehr darüber erfahren, wie ein wissenschaftlicher Verlag arbeitet, und die Grundregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?

Dann profitieren Sie als Teilnehmer des **Spektrum-Workshops** »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

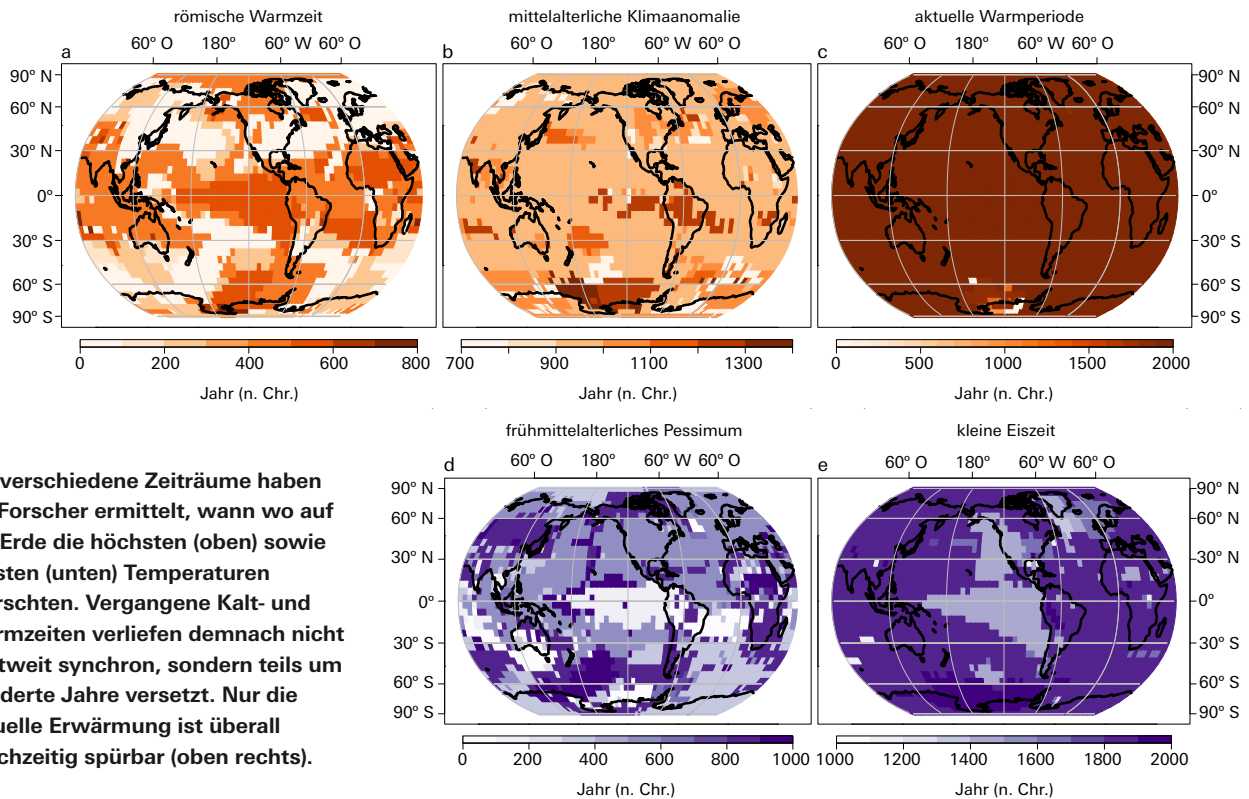
Ort: Heidelberg
Spektrum-Workshop »Wissenschaftsjournalismus«;
Preis: € 139,- pro Person;
Sonderpreis für Abonnenten: € 129,-

Infos und Anmeldung:

Spektrum.de/schreibwerkstatt

Spektrum LIVE

Veranstaltungen des Verlags
Spektrum der Wissenschaft



Für verschiedene Zeiträume haben die Forscher ermittelt, wann wo auf der Erde die höchsten (oben) sowie tiefsten (unten) Temperaturen herrschten. Vergangene Kalt- und Warmzeiten verliefen demnach nicht weltweit synchron, sondern teils um hunderte Jahre versetzt. Nur die aktuelle Erwärmung ist überall gleichzeitig spürbar (oben rechts).

Im Allgemeinen bilden Klimamodelle die Schätzungen, die mittels Proxydaten für die Klimageschichte des letzten Jahrtausends gemacht werden, genau nach. Diese Modelle überschätzen jedoch das Ausmaß der Kälteeinbrüche, die auf die größten Vulkaneruptionen unserer Zeitrechnung folgten: die Ausbrüche des Samalas auf der indonesischen Insel Lombok (1257) und des Tambora auf der ebenfalls indonesischen Insel Sumbawa östlich von Java (1815). Daher lässt sich nicht mit Sicherheit sagen, wie heftig eine Kälteperiode ausfiel, die auf eine künftige, vergleichbare Eruption folgen würde.

Die bekannte Maxime, dass sich das Klima stetig ändert, stimmt sicherlich. Doch selbst, wenn wir bis in die frühesten Tage des Römischen Reichs zurückblicken, finden wir kein Ereignis, das in Stärke oder geografischer Ausdehnung auch nur annähernd dem Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte entspricht. Dieser ist in seiner weltweiten Synchronizität beispiellos. ◀

Scott St. George ist Professor für Geografie und forscht an der University of Minnesota in Minneapolis.

QUELLEN

Neukom, R. et al.: No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature* 571, S. 2019

PAGES 2k Consortium: Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. *Nature Geoscience* 12, 2019

rature reconstructions and simulations over the Common Era. *Nature Geoscience* 12, 2019

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 571, S. 483–484, 2019

MEDIZIN WIE ENTSTEHEN KNOCHEN?

Eine spezielle Knorpelschicht sorgt dafür, dass unsere Röhrenknochen in die Länge wachsen. Forscher haben in ihr nun Stammzellen entdeckt, die sowohl Knorpel- als auch Knochenmarkstammzellen hervorbringen.

► Für das Wachstum von Röhrenknochen – etwa die langen Knochen in unseren Armen und Beinen – sind spezielle Knorpelschichten zuständig, die so genannten Wachstumsfugen. Diese trennen die Knochenenden vom Schaft und enthalten drei verschiedene Arten von Knorpelzellen (Chondrozyten): Rundliche Zellen bringen flache Abkömmlinge hervor, die sich stark teilen (prolife-

rieren) und sich entlang der Knochenlängsachse in Säulen anordnen. Dieser Säulenknorpel entwickelt sich weiter zu hypertrophen Chondrozyten, welche ihre Teilungsaktivität einstellen, durch Wasseraufnahme ihr Volumen vergrößern und später durch Knochen ersetzt werden.

Um das Längenwachstum eines Röhrenknochens aufrechtzuerhalten, müssen die Chondrozyten der Wachs-

tumsfugen kontinuierlich nachgeliefert werden. Forscher suchen schon seit Langem nach den Stammzellen, die dies bewerkstelligen. Zwei Teams, einem um Phillip T. Newton vom Karolinska-Institut in Stockholm und einem um Koji Mizuhashi von der University of Michigan, ist dies nun in parallelen Ansätzen gelungen. Beide Gruppen haben in der äußeren Schicht der Wachstumsfuge, der so genannten Reservezone, einen Stammzelltyp identifiziert, der sämtliche Knorpelzellvarianten der Wachstumsfuge sowie einige langlebige mesenchymale (nicht Blut bildende) Stammzellen des Knochenmarks hervorbringt.

Verräterische Fluoreszenz

Die Forscher haben die Entwicklung einzelner Chondrozyten verfolgt, indem sie diese gentechnisch veränderten und so dazu brachten, jeweils verschiedene fluoreszierende Proteine herzustellen. Wenn derart abgewandelte Zellen sich teilen, leuchten ihre Tochterzellen im Mikroskop in entsprechendem Fluoreszenzlicht und sind daher leicht als solche zu erkennen. Dabei nutzten die beiden Arbeitsgruppen unterschiedliche Strategien zum Markieren der Zellen: Während die Gruppe um Newton auf das Gen für Kollagen Typ 2 abzielte (ein Marker für alle proliferierenden Chondrozyten), konzentrierte sich das Team um Mizuhashi auf das Gen für das Hormon PTHrP (ParaThyroid Hormon-related Protein), das von relativ unreifen Chondrozyten hergestellt wird. Die Zellgruppen, die sich mit diesen beiden Markern erfassen lassen, überlappen einander.

Beide Forscherteams identifizierten in der Reservezone der Wachstumsfuge spezielle Zellen, die sich langsam teilen und den Ursprung für die monoklonalen (von einer einzigen Zelle abstammenden) Chondrozytensäulen bilden. Diese ziehen sich durch die gesamte Wachstumsfuge und enthalten sowohl die stark proliferierenden, flachen Zellen als auch die hypertrophen Chondrozyten (siehe »Wie Röhrenknochen wachsen«, rechts).

Newton und seine Kollegen haben genauer untersucht, wie sich die

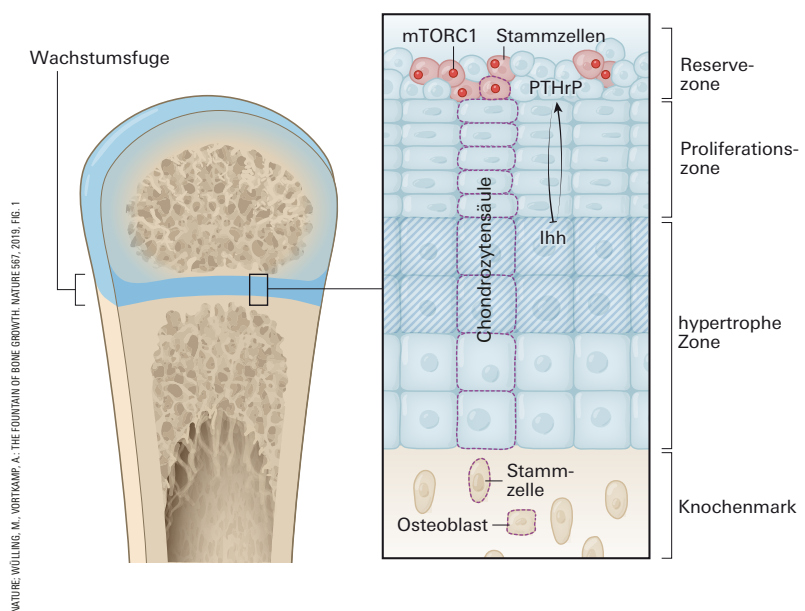
Zellen in der Reservezone vermehren. Sie erkannten, dass diese zumeist inaktiv sind, gelegentlich aber eine asymmetrische Teilung durchlaufen, bei der zwei Tochterzellen entstehen: eine, die als Stammzelle in der Reservezone verbleibt, und eine, die sich weiter teilt und deren Abkömmlinge

sich zu den verschiedenen Stadien der monoklonalen Chondrozytensäulen weiterentwickeln. Diese Beobachtungen weisen darauf hin, dass die neu entdeckten Zellen in der Reservezone Stammzellen ähneln und mittels asymmetrischer Teilung den Chondrozytenvorrat der Wachstumsfuge

Wie Röhrenknochen wachsen

Die Wachstumsfugen eines Röhrenknochens befinden sich zwischen den Enden und dem Schaft eines Knochens und bestehen aus Knorpelgewebe (dieses ist blau, verknöchertes Gewebe braun dargestellt). Sie untergliedern sich in Zonen unterschiedlicher Knorpelzellen: Die Reservezone enthält rundliche Knorpelzellen (Chondrozyten); die Proliferationszone weist Säulen aus flachen, sich schnell teilenden Chondrozyten auf; die hypertrophe Zone ist durch vergrößerte Chondrozyten gekennzeichnet, die sich nicht mehr teilen.

Forscher haben jetzt in der Reservezone bestimmte Stammzellen (rot) identifiziert, deren Tochterzellen sich in Säulen anordnen, welche von einer einzigen Stammzelle abstammen und sich durch alle Zonen der Wachstumsfuge ziehen (gestrichelt umrandet). Eine solche Säule enthält sowohl flache als auch hypertrophe Chondrozyten. Letztere können sich in Knochen bildende Osteoblasten oder in mesenchymale Stammzellen des Knochenmarks umwandeln. Die Selbsterneuerung der Stammzellen in der Reservezone wird vom Proteinkomplex mTORC1 reguliert. Weiterhin sind die beiden Signalmoleküle PTHrP, gebildet in der Reservezone, und Ihh, hergestellt von hypertrophen Chondrozyten (schraffiert), im Zusammenspiel für die Vermehrung und Reifung dieser Stammzellen wichtig.



immer wieder auffüllen. Ihre Nachkommen, die flachen, proliferierenden Chondrozyten, vermehren sich dann rasch und sorgen so für Nachschub an Knorpelmasse.

Das Team um Mizuhashi untersuchte den Stammzellcharakter der neu entdeckten Zellen im Detail und fand heraus, dass sie – obwohl sie ganz eindeutig zur Linie der Knorpelzellen gehören – ähnliche Merkmale aufweisen wie die mesenchymalen Stammzellen des Knochenmarks und auch einen ähnlichen Reifungsprozess durchlaufen wie diese. Welche Mechanismen die Ausdifferenzierung beider Stammzelltypen regeln, ist allerdings noch weitgehend unbekannt.

Newton und seine Kollegen markierten embryonale Chondrozyten und konnten damit zeigen: Einige davon entwickeln sich zu Stammzellen der Reservezone. Weiterhin ergaben die Experimente, dass in embryonalen Entwicklungsstadien die Chondrozytensäulen einen multiklonalen Ursprung haben – sie stammen also nicht nur von einer einzigen sich selbst erneuernden Stammzelle ab. Das embryonale Knochenwachstum und das im Kindheits- und Jugendstadium sind demnach überraschend unterschiedlich organisiert.

Verwickelte Zellregulation

Um die Mechanismen zu identifizieren, die den Stammzellcharakter aufrechterhalten, untersuchte das Team um Newton den Proteinkomplex mTORC1, der in anderen Stammzellen häufig aktiv ist. Eine künstlich erhöhte Aktivität dieses Komplexes führte dazu, dass sich Stammzellen nicht mehr asymmetrisch, sondern vermehrt symmetrisch teilten. Infolgedessen stieg die Anzahl der Stammzellen in der Reservezone, während der Anteil der proliferierenden Zellen des Säulenknorpels abnahm. Der mTORC1-Komplex spielt somit offenbar eine wichtige Rolle bei der Selbsterneuerung dieser knorpelspezifischen Stammzellen.

Beide Gruppen analysierten zudem die Rolle des Proteins Indian Hedgehog (Ihh), das eine große Bedeutung für die embryonale Knochenentwicklung hat. Ihh veranlasst Chondrozyten

in der Reservezone zur Herstellung des bereits erwähnten Hormons PTHrP. Dies wiederum verhindert den vorzeitigen Übergang der stark proliferierenden Knorpelzellen in den hypertrophen Zustand. Zusätzlich fördern sowohl Ihh als auch PTHrP die Teilung der flachen Chondrozyten.

Eine Hemmung des Ihh-Signalwegs führte zur Verkürzung der Chondrozytensäulen in der Wachstumsfuge, wohingegen seine Aktivierung bewirkte, dass die Zellen in der Reservezone sich häufiger teilten. Beide Gruppen

Stammzellen des Knochenmarks sorgen lebenslang für die Erneuerung des Skeletts

schlossen daraus, dass Ihh ebenfalls den Stammzellcharakter der Zellen in der Reservezone reguliert. Als Newton und seine Kollegen den Ihh-Signalweg hemmten und zugleich den Proteinkomplex mTORC1 aktivierten, wanderten einige Stammzellen aus der Reservezone in die Zone des sich stark teilenden Säulenknorpels, jedoch ohne dabei zu flachen, proliferierenden Chondrozyten zu werden. Ihh scheint folglich eher die Teilungshäufigkeit als die Identität der Stammzellen zu steuern. Da die Bildung von PTHrP aber direkt von Ihh beeinflusst wird und beide auf die Teilungsrate und Ausdifferenzierung der flachen Chondrozyten einwirken, werden weitere Versuche nötig sein, um zwischen deren Einflüssen auf die Stammzellen beziehungsweise den Säulenknorpel unterscheiden zu können.

Die Vorstellung davon, wie Knorpel durch Knochen ersetzt wird, hat sich in den zurückliegenden Jahren stark gewandelt. Früher nahm man an, in der so genannten Verknöcherungszone der Wachstumsfuge würden die hypertrophen Chondrozyten abgebaut und durch Knochen bildende Zellen, die Osteoblasten, ersetzt. Neuere

Studien haben jedoch gezeigt, dass sich ein Teil der hypertrophen Chondrozyten in Osteoblasten sowie in langlebige Stammzellen des Knochenmarks umwandeln kann. Durch ihre Markierungsexperimente fanden Mizuhashi und seine Kollegen nun heraus: Einige Abkömmlinge der Stammzellen gelangen aus der Reservezone in das Knochenmark und sind dort an dessen Aufbau beteiligt. Ausdifferenzierte Zellen entwickeln sich in der Regel nicht in einen undifferenzierten Zustand zurück – die Stammzellen der Reservezone durchlaufen mithin einen ungewöhnlichen Differenzierungsprozess, indem sie sich von undifferenzierten Chondrozytenvorläufern in ausdifferenzierte Chondrozyten und anschließend in multipotente, mesenchymale Stammzellen des Knochenmarks umwandeln.

Künftige Untersuchungen müssen klären, wie viele der mesenchymalen Knochenmarkstammzellen von Stammzellen der Reservezone abstammen und ob sie sich funktional von anderen mesenchymalen Knochenmarkzellen unterscheiden. Da die mesenchymalen Stammzellen des Knochenmarks lebenslang für die Erneuerung des Skeletts und die Heilung von Knochenbrüchen sorgen, ist das Verständnis der zu Grunde liegenden zellulären Mechanismen von großer klinischer Bedeutung. ◀

Andrea Vortkamp ist Professorin am Zentrum für Medizinische Biotechnologie der Universität Duisburg-Essen.

Manuela Wüiling forscht ebenfalls dort als wissenschaftliche Mitarbeiterin.

QUELLEN

Mizuhashi, K. et al.: Resting zone of the growth plate houses a unique class of skeletal stem cells. *Nature* 563, 2018

Newton, P. T. et al.: A radical switch in clonality reveals a stem cell niche in the epiphyseal growth plate. *Nature* 567, 2019

Ohba, S.: Hedgehog Signaling in Endochondral Ossification. *Journal of Developmental Biology* 4, 2016

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 567, S. 178–179, 2019



SPRINGER'S EINWÜRFE DER HAKEN AN DER SACHE

Kluge Krähen gebrauchen Werkzeug, um an Nahrung zu gelangen. Die erstaunlichen Fähigkeiten beruhen nicht allein auf gegenseitigem Abschauen, sondern machen sich die natürlichen Gegebenheiten flexibel zu Nutze.

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

» spektrum.de/artikel/1693112

Vor allem der Gebrauch von Werkzeugen galt lange als eine singuläre Errungenschaft, die vermeintlich ausschließlich den Menschen auszeichne. Mit dieser Sonderstellung ist es freilich vorbei, seit die Verhaltensforscherin Jane Goodall 1964 nachwies, dass manche Menschenaffen durchaus fähig sind, mit Hölzchen und Stöckchen Termiten aus deren Bauten zu fischen oder mit Steinen Nüsse zu knacken. Mittlerweile hat man Vergleichbares auch an ganz anderen Ästen unseres Stammbaums gefunden, insbesondere bei Vögeln. Unter ihnen tun sich Raben und Krähen durch ausgesprochen schlaues Benehmen hervor.

Auf eine Krähenart, die auf der entlegenen süd-pazifischen Inselgruppe Neukaledonien heimisch ist, hat sich Barbara C. Klump vom Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie in Radolfzell spezialisiert. Ihr bei der Zeitschrift »Science« eingereichter Essay zum Thema Krähen und Werkzeuge wurde 2019 von den Herausgebern des Magazins mit einem ersten Preis für junge Forschende in der Kategorie Ökologie und Umwelt ausgezeichnet (*Science* 366, S. 965, 2019).

Was steckt hinter der Vielfalt der Techniken: kulturelle Weitergabe oder Umweltfaktoren?

Die neukaledonische Geradschnabelkrähe ist die einzige wild lebende Tierart, die aus kleinen Zweigabgabeln geschickt schlanke Haken herstellt, um damit Larven und Insekten aus abgestorbenem Holz zu angeln. Wie kommen die Tiere darauf? Klump präsentierte ihnen verschiedene künstliche Kombinationen von Blättern und Zweigen und beobachtete, dass die Vögel zielsicher die Pflanzensorten herauspicken, die sich zur Produktion ihres hakenförmigen Werkzeugs

eignen – fast so, als hätten sie ein genaues Bild davon im Kopf. Außerdem sparen sie sich unnötige Arbeit: Den fertigen Haken bewahren sie an einem sicheren Ort zur wiederholten Verwendung auf.

Zudem setzen nicht alle Krähen Neukaledoniens für die Fabrikation ihres Werkzeugs auf ein und dieselbe Technik. Die Forscherin fragte sich, ob diese Variabilität wie meist angenommen für ein rein »kulturelles«, das heißt einmal hier oder da zufällig erfolgreiches und dann durch soziales Lernen weitergegebenes Verhalten spricht – oder ob dabei Umweltfaktoren eine prägende Rolle spielen.

Tatsächlich konnte Klump zeigen, dass die Varianten der Herstellungsmethode von den mechanischen Eigenschaften der verfügbaren Flora abhängen, also lang oder kurz, dick oder dünn, elastisch oder brüchig. Zwei ökologische Randbedingungen sind für den Werkzeuggebrauch der neukaledonischen Krähen entscheidend: Die Vegetation bietet den geschickten Vögeln reichhaltiges Rohmaterial, und die isolierte Lage der pazifischen Inseln hat sie lange vor Konkurrenten verschont, etwa Spechten sowie großen Raubtieren.

Auch unter den Frühmenschen, spekuliert Klump, könnte sich der Nutzen einfacher Geräte herumgesprochen haben, sobald sie nicht mehr als Einzelne dauernd auf der Flucht waren, sondern schützende Gruppen bildeten. Die Antworten auf das Problem der Menschwerdung pendeln seit jeher zwischen der Betonung unserer einzigartigen Stellung im Tierreich und dem Auffinden überraschender Gemeinsamkeiten. Zu Letzteren zählen gewiss die scheinbar simplen kulturell vererbten Methoden, mit deren Hilfe einige höhere Lebewesen gelernt haben, zusätzlichen Nutzen aus ihrer Umwelt zu ziehen. Dabei dürfen die naturgegebenen Rahmenbedingungen nicht aus dem Blick geraten – Technik braucht Ökologie.

PALÄONTOLOGIE DAS GEHEIMNIS DER VERBORGENEN REPTILIEN

Eine wenig bekannte Reptilengruppe mit verblüffenden Eigenschaften überlebte im Gegensatz zu den Dinosauriern das Massenaussterben am Ende des Erdmittelalters. Doch dann musste auch sie abtreten.



Daniel T. Ksepka ist promovierter Paläontologe und wissenschaftlicher Kurator am Bruce Museum in Greenwich (USA). Neben Choristodera-Fossilien interessiert er sich für die Evolution der Vögel.

► spektrum.de/artikel/1679066

Choristodera waren krokodilartige Reptilien des Erdmittelalters, die im Wasser lebten. Manche von ihnen, wie hier die Gattung *Philyrosaurus*, haben sich vielleicht sogar fürsorglich um ihren Nachwuchs gekümmert.



AUF EINEN BLICK ZEITGENOSSEN DER DINOSAURIER

- 1 Die Choristodera waren eine formenreiche Reptiliengruppe, die im Jura des Erdmittelalters auftauchten und erst in der Erdneuzeit aus unbekanntem Gründen ausstarben.
- 2 Alle Choristodera lebten im Wasser und ernährten sich hauptsächlich von Fisch. Mit ihrer langen Schnauze erinnern sie an Krokodile, mit denen sie aber nicht näher verwandt waren.
- 3 Viele Arten blieben klein, einige wurden jedoch bis zu fünf Meter lang. Manche Choristodera könnten Brutpflege betrieben haben.

▶ Hätten sie bis heute durchgehalten, wären sie bestimmt die Stars in Zoos und Tierhandlungen. Stattdessen blieben sie eine versteckte Fußnote in den Annalen der Evolution. Die Rede ist von Choristodera – Reptilien, die im Schatten der Dinosaurier erfolgreich urzeitliche Flüsse und Seen besiedelten und erst vor etwa 20 Millionen Jahren ausstarben. Die meisten Menschen haben den Namen Choristodera vermutlich noch nie gehört, aber manch einer hat vielleicht schon in einem Museum oder Mineraliengeschäft ein Fossil von ihnen gesehen, ohne es zu wissen.

Meine persönliche Vorliebe für diese fast vergessenen Tiere reicht etwa 15 Jahre bis in die Studienzeit zurück. Für meine Masterarbeit beschrieb ich ein neues Choristodera-Fossil, das man kurz zuvor in der Mongolei aus kreidezeitlichem Gestein geborgen hatte. Das Fundstück war fest in einem harten Gesteinsbrocken eingeschlossen. Es freizulegen, erforderte monatelange gewissenhafte Arbeit.

Täglich ging ich ins Fossilienpräparationslabor des American Museum of Natural History in New York, wo der ehrenamtliche Mitarbeiter James Klausen das Fossil von seinem Sarg aus Schluffstein befreite. Überall lagen hier neu entdeckte Fossilien herum, viele davon noch unberührt in Holzkisten oder Gipsmüllungen. Kratzen und Surren erfüllten den Raum, weil eine ganze Schar von Präparatoren die Gesteinsschichten mit Feilkolben und Luftpinseln ent-

fernten. Sobald ich eintrat, fuhr ich oft mit den Fingern durch den Sand einer Kiste, die einen riesigen Dinosaurierknochen barg. Der leichte Brandgeruch von der Gesteinspoliermaschine, die ein Fossilstück für die mikroskopische Untersuchung zu einer papierdünnen Scheibe schliiff, drang mir in die Nase.

Vermutlich war es Klausen lästig, dass ich so oft hereinschneite, aber ich wollte unbedingt wissen, wie viel von dem urzeitlichen Reptil in dem Felsbrocken erhalten geblieben war. Als Erstes wurde der Unterkieferknochen freigelegt – die spitzen Zähne standen noch an ihrem Platz. Als ich den rosa gesprenkelten Knochen in der Hand hielt, erwachte in mir eine lebenslange Zuneigung zu den Choristodera.

Als immer mehr von dem Skelett aus dem Gestein zu Tage trat, kristallisierte sich heraus, dass wir es mit einer neuen Art zu tun hatten. Zu Ehren von James Klausens Präparationskünsten nannten mein Betreuer Mark Norell sowie Ke-Qin Gao von der Universität Peking und ich das Fossil *Tchoiria klauseni* (siehe Foto unten). Als ich die ältere Literatur sowie die ersten Berichte über weitere Entdeckungen aus China las, wurde mir klar, dass es sich bei den Choristodera um eine arg unterschätzte Reptiliengruppe handelte. Es erschien mir schier unglaublich, wie lange sie überlebt und sich dabei an so viele verschiedene Umgebungen angepasst hatten. Unsere neue Spezies gehörte zur größten Gruppe namens Neochoristodera, deren Gattungen heutigen Krokodilen ähnelten, wie der eher kleine *Ikechosaurus* mit seiner schlanken Schnauze oder der riesige *Simoedosaurus* mit seinem breiten Maul.

Die Funde des Knochenkriegers

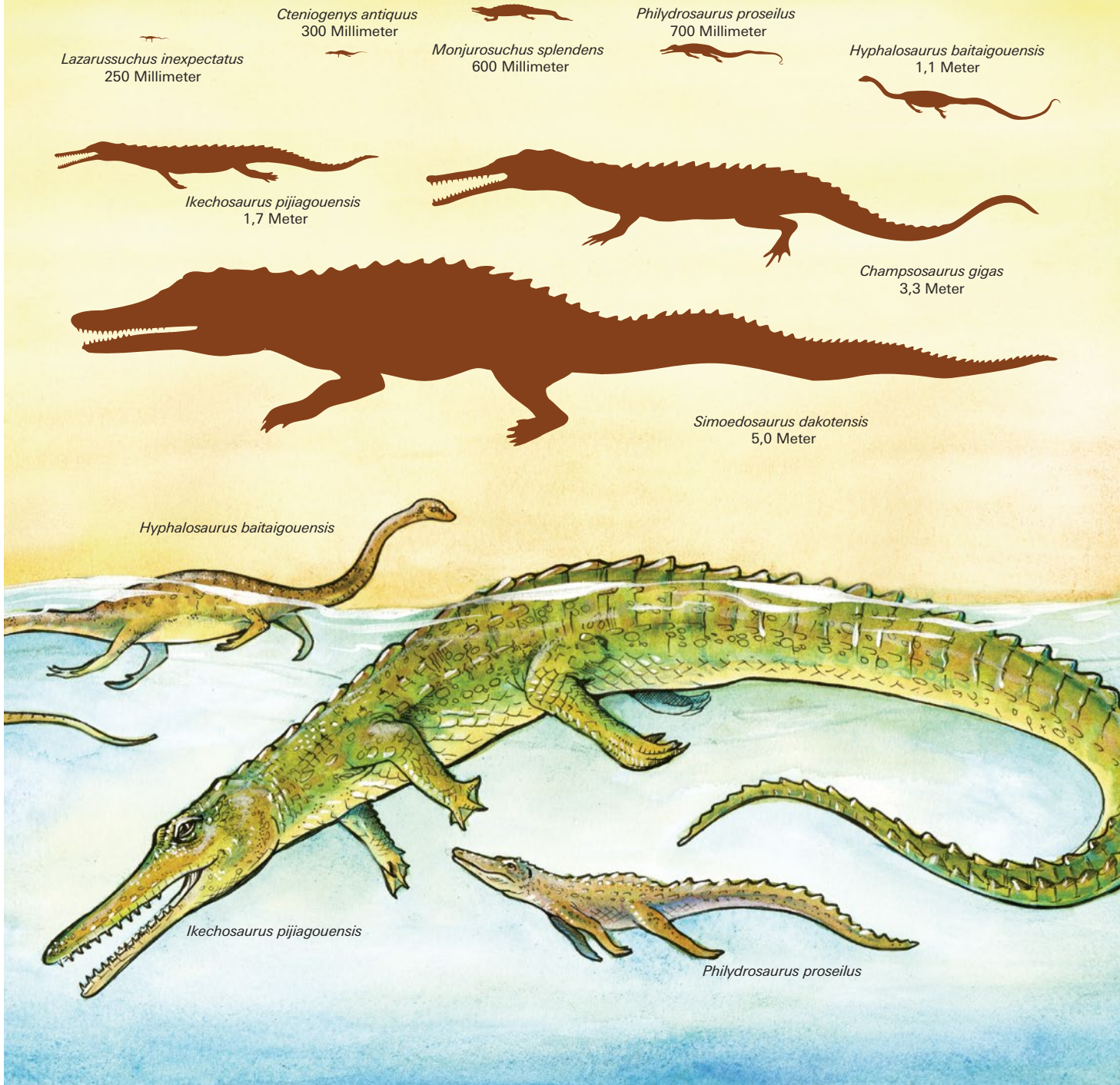
Krokodilähnliche Neochoristodera kennen Paläontologen schon seit über einem Jahrhundert. Erstmals beschrieb solche Fossilien 1876 der US-amerikanische Dinosaurierforscher Edward Drinker Cope (1840–1897), der mit seinem Kollegen Othniel Charles Marsh (1831–1899) in erbitterter Konkurrenz stand. Im Rahmen ihrer »Knochenkriege« schreckten Cope und Marsh nicht vor Bestechung und Diebstahl zurück, ja sie zerstörten sogar Fossilien, nur damit sie nicht dem jeweils anderen in die Hände fielen. Andererseits befeuerte der Wettbewerb die beiden Kontrahenten zu umfangreichen Forschungsarbeiten. Allein Cope benannte zu Lebzeiten mehr als 1000 neue Arten. Als seine Feldforscherteams das Ödland im Westen der Vereinigten Staaten durchkämmten, sammelte Cope Hunderte von Choristode-

Der etwa 35 Zentimeter lange Schädel eines krokodilartigen Choristodera-Fossils wurde aus kreidezeitlichem Gestein im Süden der Mongolei geborgen. Anhand des Fundes beschrieb unser Autor Daniel Ksepka die neue Art *Tchoiria klauseni*.



Die mannigfaltigen Choristodera

Das Spektrum der im Wasser lebenden Choristodera reicht von winzigen, eidechsenartigen Tieren wie *Cteniogenys antiquus* über Kreaturen, die wie *Hyphalosaurus baitaigouensis* an eine Miniaturausgabe des Monsters von Loch Ness erinnern, bis hin zu riesigen, krokodilähnlichen Arten wie *Simoedosaurus dakotensis*. Oft existierten unterschiedliche Formen zur gleichen Zeit am selben Ort. So kommen etliche Fossilien zusammen in Seesedimenten von Liaoning vor; die Tiere waren demnach in der frühen Kreidezeit im heutigen China zu Hause.



ra-Wirbeln, die damit zu den hier am häufigsten gefundenen Wirbeltierfossilien aus der Kreidezeit und der frühen Erdneuzeit wurden. Er erkannte an den Wirbeln eine einzigartige Eigenschaft: Ihre beiden Hauptteile, der Wirbelkörper in der Mitte und der Wirbelbogen, der das Rückenmark umschließt, verschmolzen im ausgewachsenen Zustand nicht, sondern blieben getrennt. Cope ordnete die Funde einer neuen Fossilengattung namens *Champsosaurus* zu, was so viel wie »Krokodilechse« bedeutet.

Als ich Copes Berichte und die seiner Nachfolger las, merkte ich sehr schnell, dass ich zunächst Vokabeln lernen musste, da in den wissenschaftlichen Beschreibungen der ersten Choristodera-Fossilien exotisch klingende Begriffe auftauchten. So wurden die spulenförmigen Wirbel als »amphiplat« bezeichnet – was nichts weiter bedeutet, als dass sie an beiden Enden flach sind. Im Schädel saß bei den Choristodera im Gegensatz zu anderen Reptilien ein »neomorpher«, also ein neuartig gestalteter Knochen, der mit anderen das Gehirn plattenförmig umschloss. Am ungewöhnlichsten klingt die Bezeichnung für die Zähne: Sie sind »labyrinthodont« – ihr Zahnschmelz ist labyrinthartig

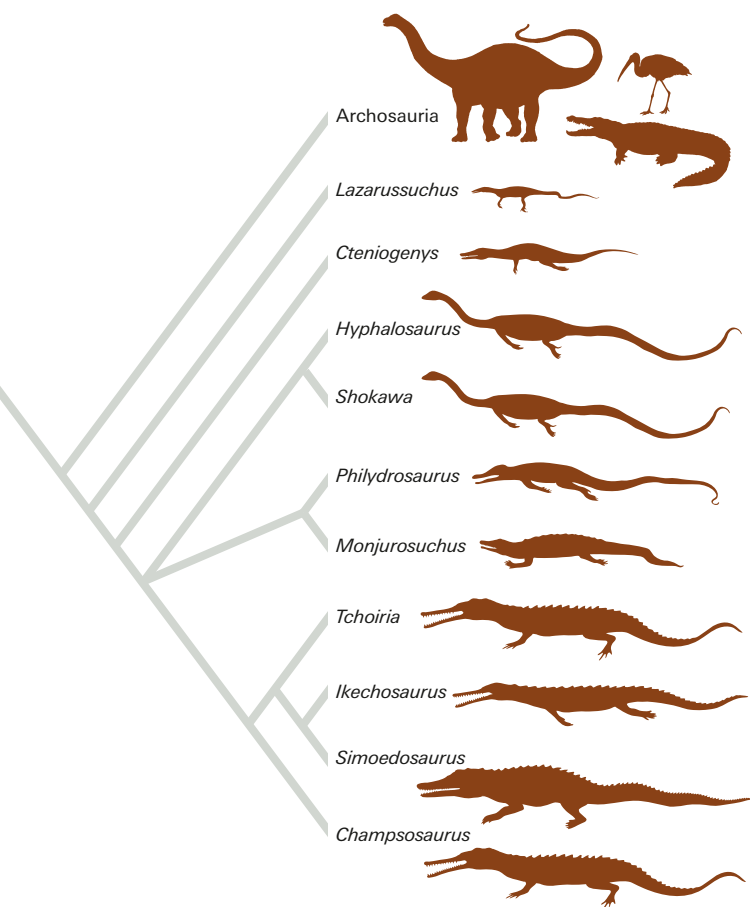
eingestülpt. Anhand dieser einzigartigen Skelettmerkmale können Paläontologen die Stellung der vielen verschiedenen Choristodera im Evolutionsstammbaum der Reptilien verorten. Außerdem liefern sie Hinweise, wie die Tiere einst lebten.

Alle Choristodera waren Wasserbewohner, und ihr ganzes Skelett spiegelt die Spezialisierung auf das nasse Element wider. Bei *Champsosaurus* saßen die Nasenöffnungen an der Spitze der Schnauze und nicht oben wie bei heutigen Krokodilen. Durch den harten Gaumen verlief eine Rinne, die das Tier mit der Zunge luftdicht verschließen konnte, so dass Luft von den Nasenöffnungen zur Lunge gelangen konnte, Wasser aber ferngehalten wurde. Damit konnte das Tier knapp unter der Wasseroberfläche schnorcheln (siehe Grafik rechts).

Außerdem verfügte *Champsosaurus* über spitz zulaufende, konisch geformte Zähne, wie man sie häufig bei Räubern findet, die glitschige Beutetiere wie Fische fangen. Neben normalen Zähnen im Ober- und Unterkiefer saßen am Munddach mehr als 100 so genannter Gaumenzähne, die eine raue, sandpapierartige Oberfläche bildeten, so dass das Tier seine Beute noch besser festhalten konnte.

Von oben betrachtet, erkennt man am Schädel von *Champsosaurus* zwei kleine und vier sehr große Öffnungen. Die kleineren, die Augenhöhlen, waren oben so positioniert, dass das Tier wie mit einem Periskop über der Wasseroberfläche sehen konnte. Die größeren, von Knochenbögen eingerahmten Öffnungen boten Platz für kräftige Kiefermuskeln, die *Champsosaurus* einsetzte, wenn er mit der Schnauze nach arglosen Beutetieren schnappte.

Die Choristodera teilen einen gemeinsamen Vorfahren mit den Archosauriern, aus denen die Krokodile, Dinosaurier und Vögel hervorgingen. Sie sind aber – trotz des krokodilartigen Äußeren (hier nicht maßstabsgerecht gezeichnet) – nicht näher mit ihnen verwandt.



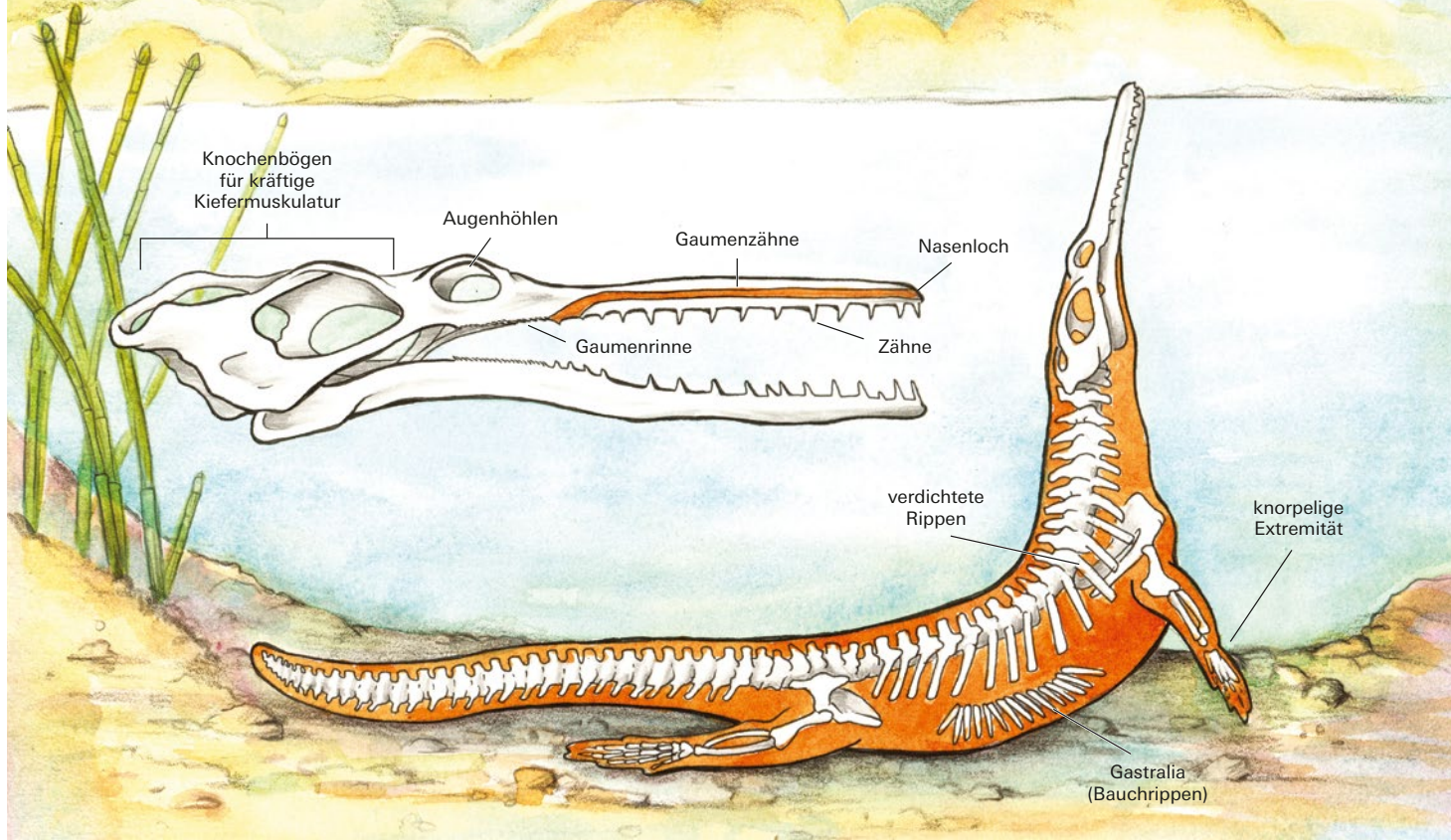
BARBARA JULIANO MIT SILHOUTTEN VON EMMA SORINICK, NACH DANIEL T. KSEPKA, AMERICAN SCIENTIST, JULI-AUGUST 2018

Ballast zum Tauchen

Um leichter unter die Wasseroberfläche absinken zu können, umgab sich *Champsosaurus* buchstäblich mit Ballast, denn seine dicken, verdichteten Rippen wirkten wie der Bleigürtel eines Tauchers. Zusätzlich zu den echten Rippen säumten Reihen dichter, spindelförmiger Gastralia oder Bauchrippen den Unterleib. Die Knochen zeichneten sich durch eine so genannte pachyosteosklerotische Struktur aus: Die Knochenrinde war erweitert, und die Markhöhle nicht hohl, sondern massiv, was insgesamt zu einer höheren Dichte führt als etwa bei menschlichen Knochen. Für den unbedarften Besucher eines Fossiliensteinbruchs ähneln die Rippen von *Champsosaurus* mit ihrer bauchigen Form sowie der tiefbraunen Farbe überreifen Bananen. Pachyosteosklerotische Knochen sind fest, schwer und widerstandsfähig gegen Verwitterung und Erosion. Wohl auch deshalb fand Copes Team so viele *Champsosaurus*-Fossilien.

Im Gegensatz zu den dichten Rippen von *Champsosaurus* blieben andere Teile des Skeletts überhaupt nicht als Fossilien erhalten. Viele Hand- und Fußgelenksknochen der Choristodera waren wie häufig bei Wassertieren knorpelig. Da sein Gewicht meist vom Auftrieb getragen wurde, brauchte *Champsosaurus* keine Ressourcen für vollständig verknöcherte Extremitäten aufzuwenden.

Mehr als ein Jahrhundert lang glaubten Paläontologen, alle Choristodera ähnelten in Größe und krokodilartiger Gestalt *Champsosaurus*. Diese Überzeugung änderte sich in



Die Gattung *Champsosaurus* (Krokodilechse), 1876 als erster Vertreter der Choristodera im Westen der USA entdeckt, lebte in der späten Kreidezeit bis zum Paläogen in der Erdneuzeit. Das über drei Meter lange Skelett verrät Anpassungen an eine aquatische Lebensweise, darunter eine Nase zum Schnorcheln, als Ballast dienende schwere Rippen sowie Zähne, mit denen die Kreatur glitschige Beutetiere festhalten konnte.

den 1990er Jahren, als immer neue Fossilien in die Museen gelangten, die man aus Seesedimenten in der chinesischen Provinz Liaoning geborgen hatte. Wiederholte Vulkanausbrüche ließen die Gewässer in der Kreidezeit schrumpfen; die Tiere wurden schnell im Sediment begraben, so dass spektakuläre Fossilien erhalten blieben, bei denen häufig sogar noch weiches Gewebe wie Haut und Federn intakt blieb. Unter den dort gefundenen prähistorischen Schätzen stieß man auch auf neue Choristodera-Fossilien mit stumpfer Schnauze, darunter ein wunderschönes Exemplar von *Monjurosuchus splendens*.

Diese Spezies kannten Paläontologen schon lange, denn das erste *Monjurosuchus*-Exemplar tauchte im Zweiten Weltkrieg während der japanischen Besetzung der Mandchurei auf. Die damaligen Wissenschaftler missdeuteten allerdings das Fossil als einen Verwandten der Brückenechse; dann ging es in den Kriegswirren verloren. Ein halbes Jahrhundert später gefundene Exemplare mit ausgezeichnet erhaltenen Schuppen präsentierten *Monjurosuchus* nun als eine Art Minikaiman im Pyjama. Er teilte mit heutigen Kaimanen die breite, u-förmige Schnauze, aber die fossilen Schuppen deuteten auf eine weiche, geschmeidige Haut hin, auf der eine Doppelreihe aus größeren, dekorativen Schuppen am Schwanz entlanglief. Auch eine weitere kleine, kaimanähnliche Spezies namens *Philydrosaurus*

proseilus lebte im heutigen China. Sie besaß an der Schnauze zwei Leisten, die vermutlich als Schmuck zum Anlocken von Weibchen dienten.

Eine große Zahl weiterer Choristodera blieben wie *Monjurosuchus* zunächst unterm Radar. Einer der kleinsten, *Cteniogenys*, war so winzig, dass man ihn leicht in einer Hand gehalten hätte. Die Gattung wurde ursprünglich als Eidechse eingestuft; erst bei näherer Betrachtung erwies sich *Cteniogenys* mit einem Alter von etwa 170 Millionen Jahren als ältester Vertreter der Choristodera.

Am seltsamsten wirkt *Hyphalosaurus*. Man kann sich dieses Tier als Loch-Ness-Ungeheuer in einer Badewanne vorstellen. Ein winziger Kopf saß am Ende eines durch zusätzliche Wirbel außerordentlich verlängerten Halses (siehe Fotos S. 42). Ein langer, peitschenförmiger Schwanz am anderen Körperende trieb *Hyphalosaurus* mittels wellenförmiger Bewegungen durchs Wasser. Und zu allem Überfluss schmückten auffällige Reihen großer, kielförmiger Schuppen an den Flanken die Kreatur und verliehen ihr ein schlankes, gestreiftes Äußeres.

In Liaoning kamen wohl durch Vulkanausbrüche in der Kreidezeit viele tausend Exemplare von *Hyphalosaurus* ums Leben. Die noch vor 20 Jahren völlig unbekanntes Gattung zählt heute weltweit zu den häufigsten fossilen Reptilien. Bei den meisten Funden aus Liaoning handelt es sich um Jungtiere mit einer Länge von unter 25 Zentimetern. Trotz der chinesischen Exportbeschränkungen für Fossilien finden Jahr für Jahr Hunderte von kleinen *Hyphalosaurus*-Fossilien ihren Weg aus dem Land in die Souvenirläden auf der ganzen Welt.

Diese sonderbaren Choristodera zeigen, welches breites Größen- und Formenspektrum die Gruppe im Lauf der Evolution entwickelte. Das brachte Paläontologen dazu, sich die Reptilien genauer anzuschauen, um mehr über ihre Biologie herauszufinden. Jetzt wurden die Choristodera



DANIEL T. KSEPKA



1999 beschrieben chinesische Forscher die Gattung *Hyphalosaurus*. In Seen der heutigen Provinz Liaoning verendeten während der frühen Kreidezeit durch Vulkanausbrüche offenbar Tausende dieser etwa einen Meter langen Choristodera. Am Skelett fällt neben dem langen Schwanz vor allem der Hals auf, der einen winzigen Kopf über Wasser hielt (oben). An der Körperseite saßen große, mit Leisten versehene Schuppen (unten).

nicht länger ignoriert, sondern erregten weltweit die Aufmerksamkeit von Wissenschaftlern.

Neue Fossilien haben uns inzwischen verraten, auf welcher erstaunlichen Weise sich diese Tiere einst fortpflanzten. In der Regel legen Reptilien Eier. Krokodile sowie die meisten Schildkröten besitzen harte, dicke Eierschalen; bei Echsen sind die Schalen dagegen eher weich und dünn. Wie sieht es bei den Choristodera aus? Hier ist die Sache etwas komplizierter.

Wir kennen tausende Skelette von *Hyphalosaurus*, aber nur eine Hand voll Eier. 2007 hatte ich die Gelegenheit, zwei davon zusammen mit chinesischen Kollegen zu untersuchen. Jedes dieser kostbaren Gebilde war so groß wie eine Rosine – und auch so runzelig. Die mineralisierte Schicht der weichen Eierschale war mit einem hunderstel Millimeter so dünn, dass wir sie mit dem Rasterelektronenmikroskop vermessen mussten.

Neben einem Ei lag ein frisch geschlüpftes Junges – ein magerer, noch nicht einmal acht Zentimeter langer Bursche (siehe Foto unten rechts). Ein adulter *Hyphalosaurus* konnte vom Kopf bis zum Schwanz eine Länge von gut einem Meter erreichen. Aber solche ausgewachsenen Tiere tauchen im Vergleich zu den fingerlangen Jungtieren sehr selten auf. Die Diskrepanz lässt darauf schließen, dass *Hyphalosaurus* ein hartes Leben führte, bei dem von jeweils hundert geschlüpften Jungtieren nur eines oder zwei überlebten und zur vollen Größe heranwuchsen.

Auf Grund der dünnen Schale vermuteten wir zunächst, dass Choristodera ihre Eier in geschützten Nestern unweit vom Wasser legten, wo sie nicht so schnell austrockneten. Ein überraschender, 2010 veröffentlichter Befund ließ uns aber umdenken: In der Körperhöhle eines ausgewachsenen *Hyphalosaurus* lagen zwei sauber angeordnete Reihen von Embryonen, die deutlich weiterentwickelt waren, als es bei einem Eier legenden Tier zu erwarten gewesen wäre. Brachte *Hyphalosaurus* lebende Junge zur Welt? Dagegen sprechen allerdings Funde von Eiern, die allein erhalten geblieben sind.

Bizarrer Fund: Ein Minimonster mit zwei Köpfen und zwei Hälsen

Vielleicht liegt die Wahrheit in der Mitte. *Hyphalosaurus* könnte vivipar gewesen sein, das heißt, die Jungen schlüpfen im Mutterleib und kamen dann lebend zur Welt, so wie es auch viele heutige Echsen und Schlangen praktizieren. Wenn dem so war, könnten die frei liegenden Eier von einem kranken oder sterbenden Weibchen abgestoßen worden sein. Oder aber *Hyphalosaurus* behielt dotterreiche Eier im Körper und legte sie erst kurz vor dem Zeitpunkt des Schlüpfens. Beide Fortpflanzungsstrategien sollten sich in einer Umwelt mit zahlreichen natürlichen Feinden bewähren, denn so müssten die Eier nicht ungeschützt tage- oder wochenlang am Ufer liegen, bevor die Jungen schlüpfen und sich dann sofort ins Wasser begeben können.

Im Inneren der weichschaligen Eier ging manchmal etwas schief. Eines der bizarrsten Fossilien, die in Liaoning ans Licht kamen, ist ein *Hyphalosaurus*-Baby mit zwei Köpfen und zwei Hälsen, die mit einem einzigen Körper verwachsen waren (siehe kleines Foto rechts). Solche Fehlbildungen entstehen in der Regel durch eine Störung im Frühstadium der Entwicklung, wenn der Embryo nur aus einer Zelle besteht. Es gibt sie auch heute immer wieder. Ich selbst hielt einmal eine frisch geschlüpfte Schildkröte mit zwei Köpfen in der Hand – das Tier konnte sich nur schwer entscheiden, in welche Richtung es laufen wollte. Aber solche Anomalien treten selten auf; deshalb hatte man so etwas bis zur Entdeckung des zweiköpfigen *Hyphalosaurus* noch nie bei einem Fossil gesehen.

Die Fossilfunde verraten uns nicht nur die Fortpflanzungsstrategie der Choristodera, sondern lüften auch das Geheimnis, wie sie ihre Jungen großzogen. Bis vor wenigen Jahren gingen Paläontologen davon aus, dass Choristodera-Babys ihre Eltern nie sahen. Die meisten heutigen Reptilien kümmern sich nicht um ihren Nachwuchs; eine bemerkenswerte Ausnahme stellen allerdings Krokodile dar, die frisch geschlüpfte Jungtiere im Maul herumtragen. Die sanfte

Seite der Choristodera sollte ein Fossilfund von 2014 ans Licht bringen – und gleichzeitig einen bösen Verdacht widerlegen.

2005 hatten chinesische Wissenschaftler ein bemerkenswertes *Monjurosuchus*-Exemplar beschrieben: Sein Inneres barg sieben Schädel von Jungtieren. Die Forscher interpretierten das Fossil als Kannibalen, der vielleicht wegen Futterknappheit seine eigenen Jungen gefressen hatte. Ätzenspuren an den winzigen Schädeln schienen auf teilweisen Abbau durch Magensäure hinzudeuten. Allerdings hatten die Fossilpräparatoren die Knochen mit Säure vom Gestein befreit. Die Schädel könnten also auch erst während der Freilegung verätzt worden sein.

Ein Jahrzehnt später ließ ein neues Fossil die Paläontologen umdenken. Eine Steinplatte enthielt ein ausgezeichnet erhaltenes Exemplar von *Philydrosaurus* zusammen mit sechs Jungtieren, die nur wenige Zentimeter von dem ausgewachsenen Skelett entfernt lagen (Bild S. 44/45). Diese Jungen waren größer als die Überreste, die man im Brustkorb des *Monjurosuchus*-»Kannibalen« gefunden hatte, und hätten mit ihren Ausmaßen auch nicht in den

Neben zahlreichen *Hyphalosaurus*-Fossilien stieß man auch auf einige Eier. Das große Foto zeigt ein Jungtier von *Hyphalosaurus baitaigouensis*, das offenbar kurz vor seinem Ende aus dem rosinen-großen Ei geschlüpft war. Ein 2007 beschriebenes Fossil belegt den ganz seltenen Fall eines missgebildeten Choristodera-Embryos mit zwei Köpfen (kleines Foto).



ERIC BUFFETAUT, MIT FRIL, GEN. VON DANIEL T. KSEPKA

DANIEL T. KSEPKA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



ISTOCK / SCOTTOR

ausgewachsenen *Philydrosaurus* gepasst. Es handelte sich also nicht um Neugeborene, sondern um mindestens einige Wochen alte Tiere. Die Halbwüchsigen waren offensichtlich vor ihrem frühzeitigen Ende mit einem Elternteil unterwegs gewesen. Solche Entdeckungen lassen für den »kannibalisches« *Monjurosuchus* eine andere Interpretation vorstellen: Vielleicht gehörten die kleinen Schädel nicht zu Jungtieren, die von einem ausgewachsenen Exemplar verschlungen worden waren, sondern es handelte sich um Föten, die kurz davor standen, das Licht der Welt zu erblicken.

Demnach sieht es so aus, als hätten sich die Choristodera zumindest nach Maßstäben von Reptilien als gute Eltern erwiesen, die ihren Nachwuchs begleiteten, um sie vor Feinden zu schützen. Nach Ansicht der Arbeitsgruppe, welche die *Philydrosaurus*-Familie beschrieben hatte, ergeben sich aus ihrer Entdeckung der Brutpflege bei Choristodera weit reichende Folgerungen für die Evolution der Reptilien: Wenn Choristodera, Krokodile und Dinosaurier ihre Jungen versorgten, könnte dies eine ursprüngliche Eigenschaft aller Reptilien gewesen sein – Schildkröten und Eidechsen hätten dann die Brutpflege erst auf ihrem weiteren Evolutionsweg wieder aufgegeben.

Am Ende der Kreidezeit schlug ein großer Asteroid in der Region der heutigen Halbinsel Yukatan ein. Unmittelbar danach raste ein Feuerball von der Einschlagstelle über das Land, ihm folgten mehrere hundert Meter hohe Meereswellen sowie weltweite Waldbrände. Monatelang verdunkelten in die Atmosphäre geschleudertes Staub und Dampf den Himmel. Ohne Sonnenlicht kam die Fotosynthese weitgehend zum Erliegen; damit brach die Nahrungskette von Pflanzen über Pflanzenfresser zu Fleischfressern zusammen. Drei Viertel aller Arten starben aus – darunter die Dinosaurier mit Ausnahme der Vögel.

Überleben nach dem Untergang

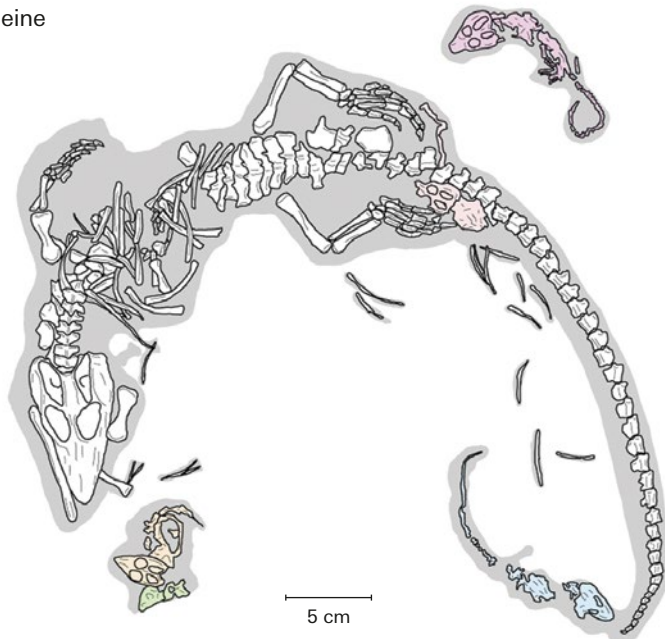
Inmitten der Zerstörung überlebten die Choristodera. *Champsosaurus* ging es in Nordamerika anscheinend nach dem Asteroideneinschlag genauso gut wie davor. Das Geheimnis der Choristodera lag wohl in ihren geringen Ansprüchen an eine Mahlzeit. Denn im Gegensatz zu den meisten anderen Lebewesen des Erdmittelalters, die von der auf Fotosynthese basierenden Nahrungskette abhingen, begnügten sich Choristodera mit Abfällen. Sie verpeisten auch mal einen toten Fisch, der schon seit Wochen am Boden eines Sees verwesete, oder den von Fäulnisgasen aufgeblähten Kadaver eines verhungerten Dinosauriers. Die Detritusnahrungskette blieb noch einige Zeit bestehen: Winzige Aasfresser, die am Boden der Seen verwesendes Material verwerteten, bildeten ihrerseits die Nahrungs-

grundlage für größere Gliederfüßer und Fische, und die wiederum wurden zur Beute für Reptilien, die das Massenaussterben überstanden hatten – so wie die Choristodera, die sich weggeduckt hatten und nun auf bessere Zeiten warteten.

Zwar überlebten die Choristodera den Asteroideneinschlag, doch während der Erdneuzeit verschwanden sie. Immer wieder suchte ich bei den Fossilien nach einem plausiblen Grund für diesen Untergang – ohne auf eine heiße Spur zu stoßen. Manche Wissenschaftler vermuten, die Krokodile hätten die Choristodera überflügelt; zu jener Zeit hatten beide Gruppen jedoch schon seit Jahrmillionen nebeneinander gelebt. Klimaschwankungen wurden ebenfalls in Erwägung gezogen, aber Choristodera gediehen nicht nur in der warmen Welt des Erdmittelalters, sondern schafften es auch bis zum nördlichen Polarkreis, wo es selbst in der Kreidezeit im Winter ziemlich kühl werden konnte.

Nach Ansicht mancher Fachleute liegt die Antwort in einer Kombination aus Klimawandel und Konkurrenz. Etwa zu der Zeit, als die meisten noch verbliebenen Choristodera ausstarben, hatten die Temperaturen einen Höhepunkt erreicht. Offensichtlich kamen Krokodile mit dem nun herrschenden Treibhausklima besser zurecht und verdrängten so vielleicht die Choristodera aus ihrem Lebensraum. Was auch immer die Ursache war: Einst sehr verbreitete Choristo-

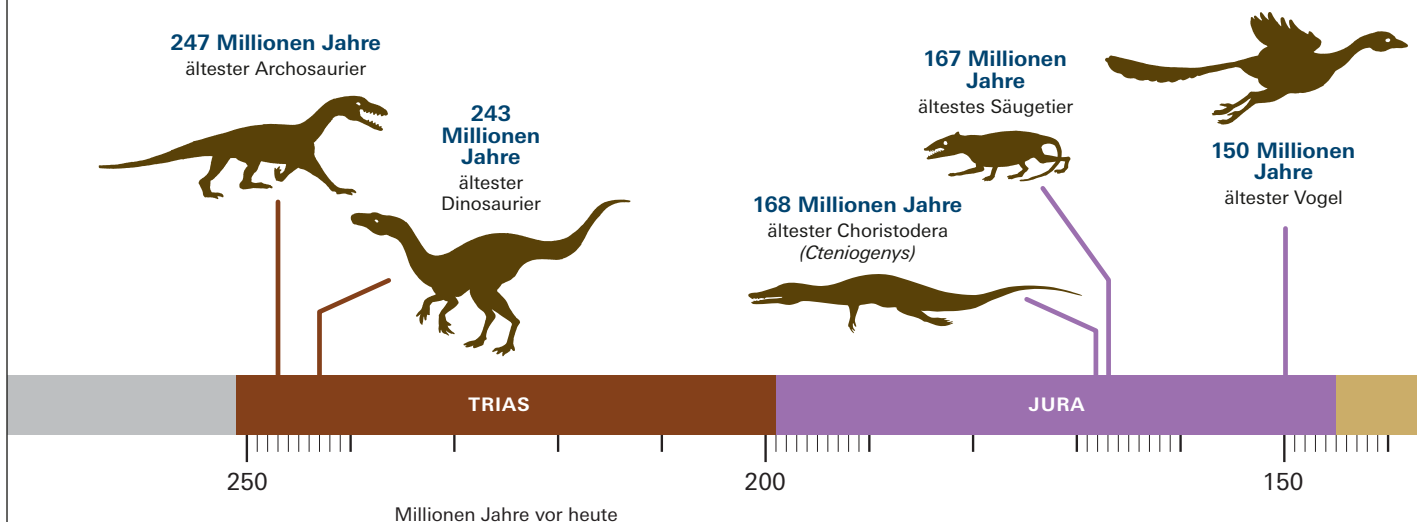
2014 entdeckten chinesische Paläontologen ein ausgewachsenes *Philydrosaurus*-Fossil zusammen mit mehreren Jungtieren (Maßstab = 5 Zentimeter). Der Fund legt nahe, dass Choristodera Brutpflege betrieben hatten.



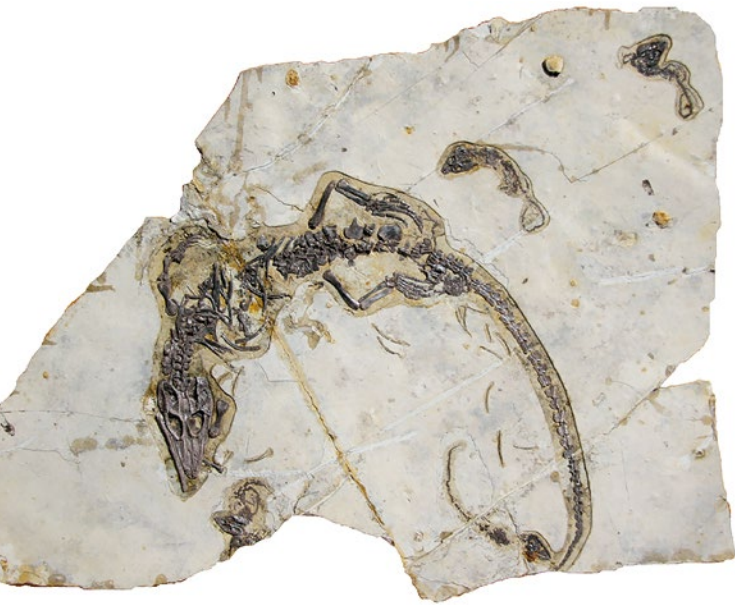
LIU, J. ET AL. POSTNATAL PARENTAL CARE IN A CRETACEOUS DIAPSID FROM NORTHWESTERN CHINA. *PROCEEDINGS NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES* JOURNAL 19, 2015, FIG. 1B. NOTIZING GERECHTIGT VON SPRINGER NATURE / CC

Karriere im Erdmittelalter

Die Choristodera tauchten im Jura vor etwa 170 Millionen Jahren auf und entwickelten sich während des Erdmittelalters parallel zu den Dinosauriern. Im Gegensatz zu Letzteren überlebten sie den Asteroideneinschlag am Ende der Kreidezeit vor 66 Millionen Jahren und schafften es bis in die Erdneuzeit.



BARBARA AULICINO MIT SILHOUETTEN VON EMMA SKURNICK / AMERICAN SCIENTIST JULI-AUGUST 2018



LIU, J. ET AL.: POST-NATAL PARENTAL CARE IN A CRETACEOUS DIAPSID FROM NORTHEASTERN CHINA. GEOSCIENCES JOURNAL 19, 2015. FIG. 1A. NOTIZIUM GERECHTIGT VON SPINDLER NATURE / CCC

dera wie *Champsosaurus* räumten etwa zehn Millionen Jahre nach dem Ende der Dinosaurier das Feld.

Eine kleine Gruppe hielt etwas länger durch. So überraschte ein Fossil aus Frankreich die Paläontologen, lag es doch in einem Gestein, das auf 30 Millionen Jahre nach dem mutmaßlichen Ende der Choristodera datiert wurde. Die Entdeckung barg sogar eine doppelte Überraschung: Es handelte sich um ein kleines, primitives Mitglied einer Abstammungslinie, die sich offensichtlich mindestens 100 Millionen Jahre lang verborgen hatte, ohne in den Fossilfunden irgendwelche Spuren zu hinterlassen. Die Paläontologen taufte das Fossil auf den Namen *Lazarussuchus* – schien doch hier eine für ausgestorben gehaltene Tierart quasi wie der biblische Lazarus »von den Toten auferstanden« zu sein. Die Auferstehung währte allerdings nur kurz: *Lazarussuchus* verschwand wenige Millionen Jahre später, und damit waren die Choristodera endgültig ausgestorben.

Das Leben auf der Erde steckt voller vergessener Geschichten. Die Choristodera hinterließen eine Fülle an Fossilienmaterial, so dass wir im Gegensatz zu vielen anderen Organismen ihre Existenz und Evolution belegen können. Auch wenn nie ein Kind ein *Hyphalosaurus*-Baby in einem Glasgefäß als Haustier mitbringen oder bei der *Champsosaurus*-Fütterung im Zoo zusehen wird, diese Fossilien regen zumindest unsere Fantasie an.

Immer noch kommen Jahr für Jahr weitere Choristodera-Fossilien ans Licht. Manchmal befinden sich neue Arten darunter, und manchmal verschaffen sie uns eine Ahnung davon, wie ihre Haut aussah, wie lang ihr Schwanz war oder sogar welches Gehirn sie besaßen. Es gehört zu den kleinen Nervenkitzeln meines Berufs, eine E-Mail zu öffnen, um das grobkörnige Foto eines Choristodera-Fossils aus China mit einer Zigarette als Größenvergleich zu bewundern. Vielleicht wird uns schon der nächste Fund verraten, warum genau diese rätselhaften Reptilien am Ende verschwanden. ◀

QUELLEN

Gao, K.-Q., Ksepka, D.T.: Osteology and taxonomic revision of *Hyphalosaurus* (Diapsida: Choristodera) from the Lower Cretaceous of Liaoning, China. *Journal of Anatomy* 212, 2008

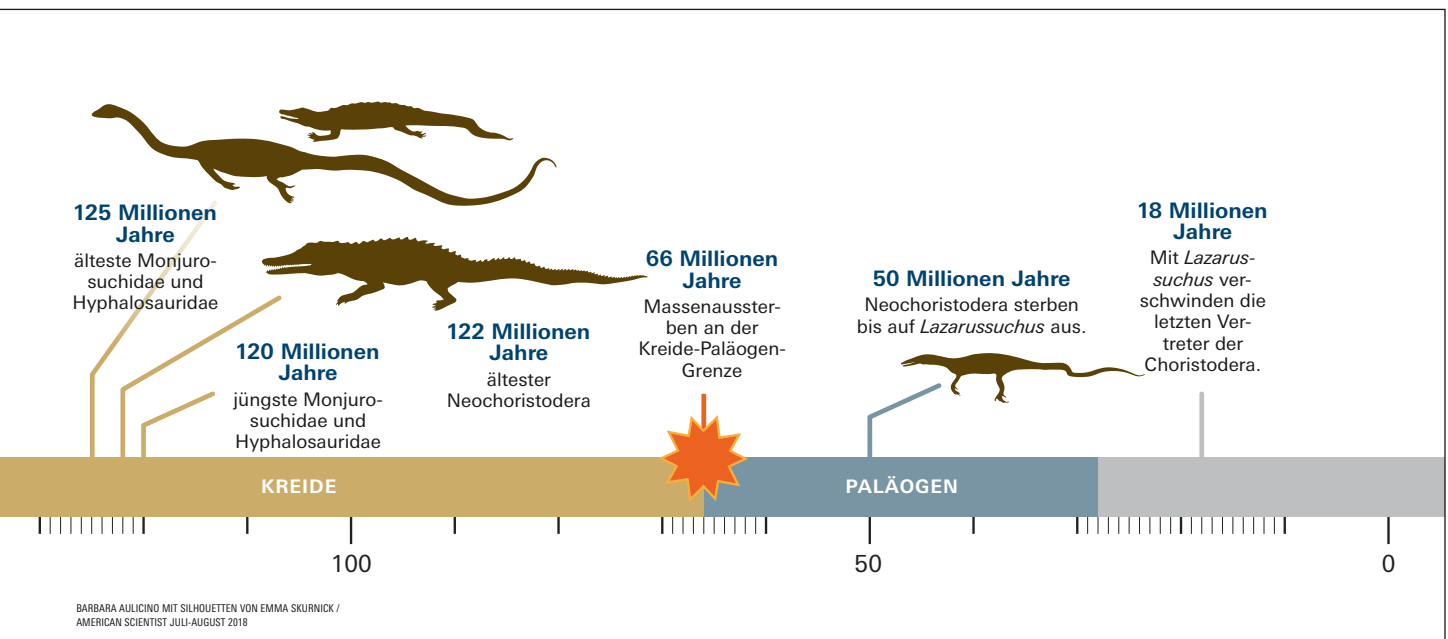
Hou, L.-H. et al.: Implications of flexible-shelled eggs in a Cretaceous choristoderan reptile. *Proceedings of the Royal Society B* 277, 2010

Ksepka, D.T. et al.: A new choristodere from the Cretaceous of Mongolia. *American Museum Novitates* 3468, 2005

Lü, J. et al.: Post-natal parental care in a Cretaceous diapsid from northeastern China. *Geosciences Journal* 19, 2015


AMERICAN
Scientist

© American Scientist
www.americanscientist.org



GENETIK IM BUND MIT SELBSTSÜCHTIGEN GENEN

Wie »Gene Drives« dabei helfen können, Schädlinge und Krankheitserreger zu bekämpfen.



Stechmücken der Gattung *Anopheles* übertragen Malariaerreger und verursachen jährlich dutzende Millionen Erkrankungsfälle. Mit Hilfe von »Gene Drives« könnte es gelingen, sie massenweise unschädlich zu machen.

CDC / JAMES GATHANY



Ernst A. Wimmer (links) ist Professor für Entwicklungsbiologie an der Georg-August-Universität Göttingen. **Georg Oberhofer** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am California Institute of

Technology. Beide erforschen neuartige Ansätze zur Schädlingsbekämpfung, die auf entwicklungsbiologischen Genen und molekularbiologischen Werkzeugen beruhen.

» spektrum.de/artikel/1693096

Seit einigen Jahren berichten die Medien vermehrt über so genannte Gene Drives – und vermelden Erstaunliches. Mittels Gene Drive könnte man ganze Populationen von Krankheitsüberträgern vollständig unschädlich machen oder ausrotten, heißt es. Vielleicht ließen sich damit sogar Arten vernichten. Die Methode kommt besonders im Hinblick auf Malaria-Mücken immer wieder ins Gespräch. Was soll man davon halten? Was ist Gene Drive, was lässt sich damit erreichen – und was nicht?

Gene Drive, im Deutschen auch als »Genturbo« bezeichnet, wird zwar oft als innovatives gentechnisches Verfahren dargestellt, ist aber keine neue Erfindung von Molekularbiologen. Vielmehr handelt es sich um ein natürlich vorkommendes Phänomen bei bestimmten Genen, die gewissermaßen selbstüchtig handeln, indem sie die mendelschen Vererbungsregeln aushebeln und sich in überproportional viele Nachkommen einschreiben.

In einem Organismus mit dem üblichen zweifachen (»diploiden«) Chromosomensatz liegt ein bestimmtes Gen meist in zwei Varianten vor, den »Allelen«. Diese unterscheiden sich in der Regel leicht voneinander. Eines der Allele kommt von der Mutter, das andere vom Vater. Bei der sexuellen Fortpflanzung gibt ein Organismus nur eines seiner beiden Allele an den Nachwuchs weiter – welches, hängt in der Regel vom Zufall ab und wird bei jedem Paarungsakt neu ausgewürfelt. Im Schnitt erhält die eine Hälfte der Nachkommen das eine Allel und die andere Hälfte das andere. Liegt kein Selektionsdruck vor, ändert sich die Häufigkeit eines bestimmten Allels in einer Population daher normalerweise nicht. Zeigt eines der Allele jedoch ein »Drive«-Verhal-

ten, dann ist es in überproportional vielen Nachkommen zu finden (im Extremfall in allen) und verdrängt somit sein Gegenstück. Das Drive-Allel wird folglich in die Population »eingetrieben«.

Wie funktioniert das? Etwa, indem das Drive-Allel die Übergabe seines Schwester-Allels an die nächste Generation sabotiert. Fachleute bezeichnen das als Interferenz. Das Drive-Allel kann beispielsweise die Zellen des Elternorganismus dazu bringen, ein Gift herzustellen, welches während der sexuellen Fortpflanzung an die Geschlechtszellen und die daraus hervorgehenden Embryonen weitergegeben wird (siehe Grafik S. 48). Zugleich enthält das Drive-Allel den Bauplan für das Gegengift. Embryonen, die bloß Schwester-Allele abbekommen haben, können das Gegengift nicht bilden und sterben. Nur jene mit mindestens einem Drive-Allel sind dazu in der Lage und überleben. Im Ergebnis besitzen alle Nachkommen die Drive-Variante.

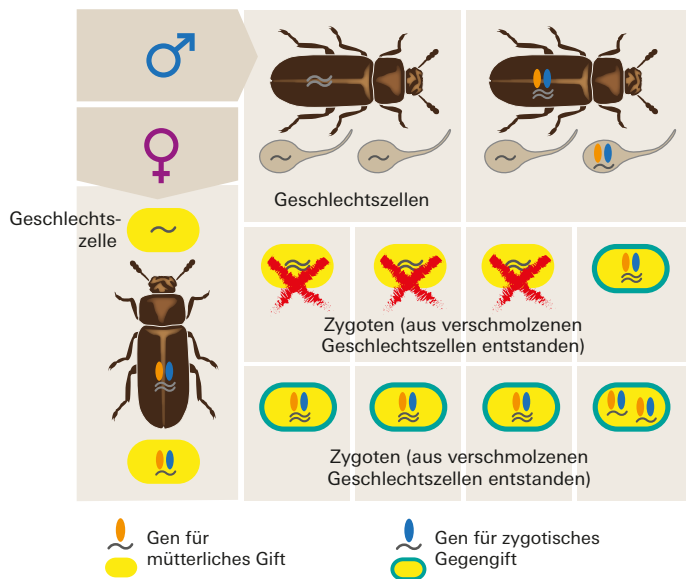
Den eigenen Nachwuchs vergiften

Ein solcher Mechanismus ist vom Reismehlkäfer *Tribolium castaneum* bekannt. Forscher haben ihn »Medea« genannt (maternaler Effekt dominanter embryonaler Arretierung) – in Anlehnung an die Frauengestalt der griechischen Mythologie, die ihre eigenen Kinder tötet. Reismehlkäfer tragen sogar mehrere verschiedene Gene, von denen Medea-Allele existieren. Diese sind, mit Ausnahme von Indien, weltweit verbreitet. In indischen Käferpopulationen kursiert ein genetisches Element namens Hybrid-Inkompatibilitätsfaktor, das aus Medea-Allelen Selbstmordgene macht. Individuen mit solchen Allelen können sich deshalb dort nicht vermehren. Dies ist ein Beispiel dafür, dass die Natur immer wieder Wege findet, »selbstsüchtige« Gene in Schach zu halten.

Neben der Interferenz gibt es in der Natur noch weitere Strategien, mit deren Hilfe sich Gene überproportional stark verbreiten. Etwa die so genannte Überreplikation: Wenn eine Zelle sich teilt und zwei Tochterzellen mit je eigenem Erbgut hervorbringt, wird normalerweise jedes ihrer Chro-

AUF EINEN BLICK ZWEISCHNEIDIGES SCHWERT DER MOLEKULARBIOLOGIE

- 1 Von einem Gene Drive spricht man, wenn »selbstsüchtige« Gene sich in überproportional viele Nachkommen einschreiben und dadurch übermäßig stark in der Population verbreiten.
- 2 Gene Drives lassen sich nutzen, um Schädlingsorganismen gezielt zu bekämpfen: Sie machen es möglich, ganze Populationen zu vernichten oder auszutauschen.
- 3 Dies geht jedoch mit ökologischen Risiken einher. Forscher arbeiten daher an Verfahren, um die Wirkung von Gene Drives örtlich oder zeitlich zu begrenzen.



Unter Reismehlkäfern kursieren »selbstsüchtige« Genvarianten, »Medea« genannt, mit den Bauplänen für ein Gift und dessen Gegengift. Weibchen mit solchen Erbanlagen stellen das Gift (gelb) her und geben es bei der Fortpflanzung an ihren Nachwuchs weiter. Nur diejenigen Embryonen, die eine selbstsüchtige Genvariante erben, können das Gegengift bilden und überleben.

mosomen – und jedes darauf liegende Gen – genau einmal kopiert. Einige genetische Elemente haben es im Zuge der Evolution aber geschafft, zusätzliche Kopien von sich selbst zu erzeugen, ohne dabei den regulären Kopierapparat der Zelle zu nutzen. Zu ihnen gehören die springenden Gene, die auch »Transposons« genannt werden. Ein Transposon kann sich gezielt aus dem Chromosom heraus schneiden und an einer anderen Stelle wieder einfügen (cut and paste) oder eine Kopie seiner selbst woanders einbauen (copy and paste). Letzterer Mechanismus führt dazu, dass das springende Gen häufiger im Genom präsent ist und somit vom Zellapparat entsprechend zahlreicher vervielfältigt und vererbt wird.

Ein gut untersuchtes Transposon ist das P-Element im Genom der Taufliege *Drosophila melanogaster*. Es nistete sich vermutlich erst vor zirka 100 Jahren im Erbgut dieser Tiere ein. Innerhalb weniger Jahrzehnte breitete es sich dann in allen natürlich vorkommenden Populationen weltweit aus. Die einzigen *D.-melanogaster*-Stämme, die heute kein P-Element besitzen, haben Wissenschaftler vor der Mitte des 20. Jahrhunderts gesammelt und seither isoliert im Labor gehalten. Das Umherspringen dieses Transposons im Genom der Fliegen per »cut and paste« oder »copy and paste« erzeugt Mutationen, die wichtige Gene zerstören können. Daher haben sich, evolutionär bedingt, bestimmte genetische Elemente bei den Tieren verbreitet, die das Transposon unter Kontrolle halten. Auch unser eigenes Genom besteht fast zur Hälfte aus Transposons oder deren Überresten, was diese zusammengefasst zur wohl erfolgreichsten Klasse »egoistischer« Gene macht.

Weitere Erbanlagen, die einen Mechanismus der Überreplikation zeigen, sind die so genannten Homing-Elemente. Dabei handelt es sich um Nukleotidsequenzen, die den Bauplan einer Endonuklease enthalten – eines Proteins, das die DNA an einer bestimmten Stelle schneidet. Wenn in einem Organismus mit zweifachem Chromosomensatz auf einem von zwei homologen Chromosomen ein Homing-Element liegt und der Zellapparat daraus die entsprechende Endonuklease herstellt, dann erkennt diese auf dem anderen Chromosom eine bestimmte Zielsequenz und spaltet die DNA dort. Der Schnitt erfolgt dabei exakt an jener Position, an der sich auf dem ersten Chromosom das Homing-Element befindet. Ein zelleigener Reparaturmechanismus, die so genannte homologiedirigierte Reparatur, flickt die Stelle daraufhin. Er nutzt dafür das intakte erste Chromosom (mit dem Homing-Element) als Vorlage, um die DNA wieder korrekt zusammenzufügen. Dabei baut er das Homing-Element in das andere Chromosom ein. Infolgedessen liegt dieses anschließend auf beiden homologen Chromosomen vor. Als Ergebnis erhalten alle Nachkommen des Organismus das Homing-Element, das somit »Drive« zeigt, sprich in die Population eingetrieben wird.

Bereits in den 1980er und 1990er Jahren haben Wissenschaftler versucht, Konzepte zu entwickeln, um »selbstsüchtige« Gene wie Transposons zur Schädlingsbekämpfung zu nutzen. Zunächst ließ sich das jedoch nicht erfolgreich umsetzen. 2003 schlug der Evolutionsgenetiker Austin Burt vom Imperial College (Großbritannien) vor, die in Hefen gefundenen Homing-Elemente nachzubauen, gezielt zu modifizieren und für einen absichtlichen Gene Drive zu nutzen. Dabei lassen sich zwei verschiedene Strategien unterscheiden, der »Austausch-Drive« und der »Unterdrückungs-Drive«.

Auswechseln oder auslöschen?

Beim Austausch-Drive geht es darum, eine bestimmte Schädlingspopulation zu verändern, indem man deren Mitglieder durch gentechnisch veränderte Individuen ersetzt (siehe Grafik rechts). Oft wird das im Hinblick auf Stechmücken diskutiert, die verschiedene Krankheitskeime übertragen, darunter die Erreger der Malaria, des Zikafiebers, Gelbfiebers und Denguefiebers. Forscher haben künstliche Gene entwickelt, die Stechmücken entweder immun gegen solche Krankheitserreger machen oder verhindern, dass die Insekten entsprechende Keime auf ihre Wirte übertragen. Um Moskitos in freier Wildbahn durch gentechnisch veränderte zu ersetzen, die keine Krankheiten mehr verbreiten, koppeln Forscher das künstliche, unschädlich machende Gen an einen Drive-Mechanismus, der dafür sorgt, dass es in die gesamte Stechmückenpopulation eingetrieben wird.

Beim Unterdrückungs-Drive hingegen soll die Zielpopulation reduziert oder ausgelöscht werden. Erreichen lässt sich das, indem man ein künstliches Gen, das die Fitness stark beeinträchtigt, mit einem Drive-Mechanismus verbindet und so in die Population eintreibt – oder dadurch, dass man mit Hilfe eines Drive-Elements gezielt ein Gen verändert, das für einen unverzichtbaren biologischen Prozess benötigt wird. Beispielsweise lassen sich per Gene Drive

bestimmte Erbanlagen in die Population einschleusen, die gezielt dafür sorgen, dass die Weibchen absterben, steril werden oder sich in Männchen umwandeln. Unter normalen Umständen würde sich so ein Gen nie ausbreiten können, da es in kürzester Zeit aus dem Genpool verschwände. Der Gene Drive soll aber dafür sorgen, dass es auf alle Nachkommen der betroffenen Tiere übergeht, was ein Einbrechen oder vollständiges Verschwinden der Population zur Folge haben kann. Die Methode ließe sich beispielsweise anwenden, um invasive Schädlinge zu bekämpfen, die ein Ökosystem zu vernichten drohen – etwa Ratten, die auf Inseln eingeschleppt wurden und nun die dortige Fauna dezimieren. Ein großer Vorteil von Unterdrückungs-Drives besteht darin, dass sie – zumindest in der Theorie – ausschließlich auf die Zielspezies einwirken, da sich Drive-Elemente über sexuelle Fortpflanzung verbreiten.

Lange Zeit war es jedoch schwierig, geeignete molekulare Werkzeuge zu finden, die an einer ganz bestimmten Stelle im Genom schneiden, um eine Überreplikation und somit einen Gene Drive einzuleiten. Das änderte sich tief greifend mit der Entdeckung der Genschere CRISPR-Cas (siehe Spektrum Oktober 2017, S. 50). Dieses Molekülsystem vermittelt in der Natur vielen Mikroben eine gewisse Immunität gegenüber Viren und lässt sich in abgewandelter Form nutzen, um die Genome aller möglichen Organismen gezielt zu verändern. Mit CRISPR-Cas bekamen die Forscher ein Werkzeug an die Hand, das DNA-Moleküle an beliebigen, genau vorgebenden Stellen schneiden kann. Forscher um Kevin Esvelt und George Church – beide an der Harvard Medical School in Boston – haben in einer Konzeptstudie im Jahr 2014 dargelegt, wie sich damit künstliche Homing-Elemente bauen lassen, die Drive-Eigenschaften aufweisen, um in der Natur vorkommende Populationen zu verändern.

Die anfängliche Euphorie legte sich aber bald wieder, als herauskam, dass CRISPR-Cas hier nicht so effizient funktioniert wie anfänglich vermutet. Eines der Hauptprobleme dabei: Gegen Homing-Elemente, die auf dieser Genschere

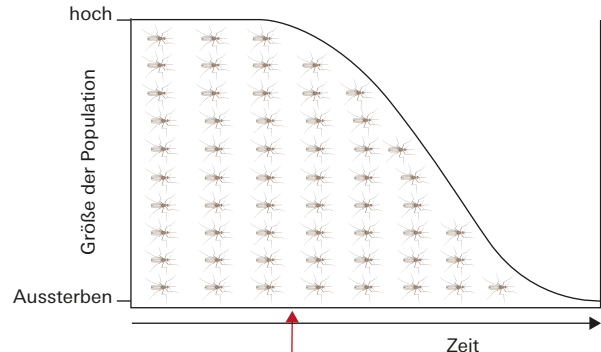
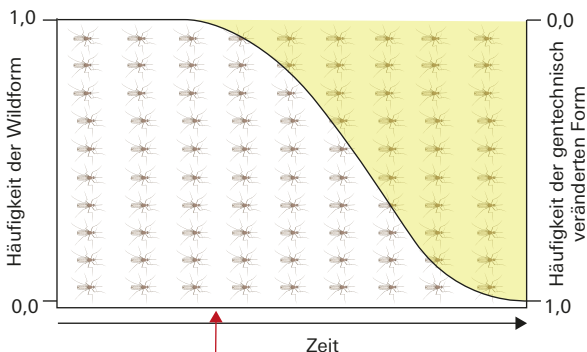
basieren, werden die Zielorganismen sehr schnell resistent. Ein genauerer Blick auf die Funktionsweise von CRISPR-Cas hilft das zu verstehen. Das Molekülsystem besteht aus einer Endonuklease (einem DNA spaltenden Protein) und einer so genannten Leit-RNA (Guide-RNA). Letztere besitzt einen programmierbaren, variablen Teil, der sich aus 20 Nukleotiden zusammensetzt. Wenn der Komplex aus Leit-RNA und Endonuklease einen Abschnitt auf dem DNA-Strang findet, dessen Sequenz exakt zur Abfolge der 20 Nukleotide passt, spaltet er den Strang an dieser Stelle. Sobald die betroffene Zelle den Strangbruch registriert, aktiviert sie ihre DNA-Reparatursysteme, um ihr Erbmolekül wieder zu flicken.

Gentechnischer Eingriff mit CRISPR-Cas erzeugt Resistenz gegen sich selbst

Im Zuge der Evolution haben Zellen diverse Reparaturmechanismen entwickelt, die bei solchen Vorfällen zum Einsatz kommen können. Ein Gene Drive stellt sich aber lediglich bei einem davon ein, nämlich bei der bereits erwähnten homologiedirigierten Reparatur. Leider ist in vielzelligen Tieren aber ausgerechnet diese nur begrenzt aktiv – hier erfolgt die Reparatur des Strangbruchs in der Regel durch »nichthomologe Endverknüpfung«, also das einfache Zusammenstückeln der Strangenden. Dabei kommt es häufig zu Fehlern, beispielsweise dem Einfügen zusätzlicher Nukleotide oder dem Verlust ebensolcher. Mit anderen Worten: Die DNA-Reparatur erzeugt Mutationen, indem sie die Nukleotidsequenz an der Reparaturstelle verändert. Infolgedessen kann das CRISPR-Cas-System den entsprechenden Abschnitt auf dem geflickten Strang nicht wiedererkennen, denn seine veränderte Sequenz passt jetzt nicht mehr zu den 20 Nukleotiden der Leit-RNA. Falls das Gen, das in diesem Abschnitt liegt, trotz der eingefügten Mutationen funktionstüchtig bleibt, kann der Organismus unbeinträchtigt weiterleben, hat aber nun eine Resistenz gegen das Drive-Element erworben.

Mehrere Arbeitsgruppen haben gezeigt, dass solche Resistenzen mitunter sehr schnell entstehen und den Gene Drive verhindern – darunter ein Team um Tony Noland vom Imperial College (Großbritannien) im Jahr 2017, ein weiteres um Philipp W. Messer von der Cornell University im Jahr 2017 sowie ein drittes um einen von uns (Wimmer) im Jahr 2018. Das grundsätzliche Problem bei Homing-Elementen, die für Endonukleasen codieren, liegt somit darin, dass sie genau an ihrer Zielsequenz für eine erhöhte Mutationsrate

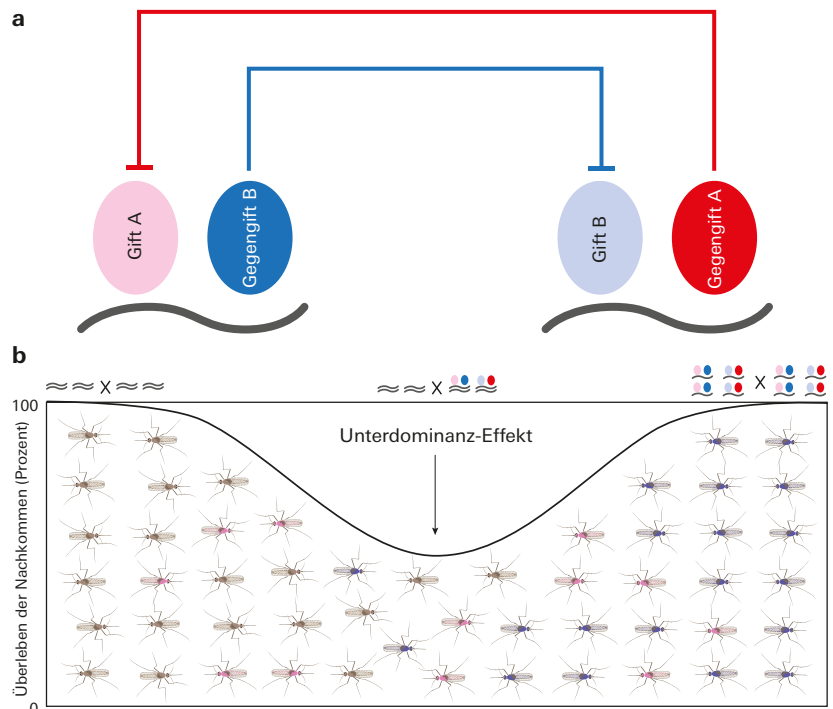
Mit Hilfe von Gene Drives lassen sich die Mitglieder einer Schädlingspopulation entweder durch gentechnisch veränderte Individuen ersetzen (links) oder vollständig vernichten (rechts). Die roten Pfeile kennzeichnen jeweils die Freisetzung des Drive-Gens.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BIOWE GÖRFX NACH GABRIEL P. ET AL. (2017) / CRISPR-CAS SYSTEMS FOR GENOME EDITING IN INSECTS. GENOME BIOLOGY 15, 2014, FIG. 1

Prinzip eines hochschwelligigen Gene Drive

Der genetische Bauplan für Gift A ist mit dem für Gegengift B gekoppelt; ebenso der Bauplan für Gift B mit dem für Gegengift A (a). Erhalten die Nachkommen bloß eines dieser Kopplungskonstrukte, können sie nur ein Gegengift herstellen und sterben an dem Toxin, das sie nicht neutralisieren können. Individuen, die diese Konstrukte »heterozygot« tragen, also lediglich auf je einem von zwei homologen Chromosomen, haben deshalb weniger überlebende Nachkommen (»Unterdominanz-Effekt«, b). Die Kopplungskonstrukte verbreiten sich nur dann in der Population, wenn mehr als die Hälfte der Individuen sie in ihrem Erbgut tragen. Ein Gene Drive, der darauf basiert, setzt sich also nur durch, wenn entsprechend viele gentechnisch veränderte Tiere freigesetzt werden – was die Möglichkeit bietet, seine Verbreitung zu kontrollieren.



sorgen. Gene Drives, die auf solchen Elementen basieren, vermitteln folglich eine Resistenz gegen sich selbst.

Mehrere Forschergruppen haben sich in letzter Zeit damit befasst, wie man das vermeiden kann. Dabei haben sich zwei Strategien als erfolgreich herausgestellt. Zum einen lassen sich an Stelle einer einzigen Leit-RNA einfach mehrere davon verwenden. Die Idee dahinter lautet, dass es mit zunehmender Anzahl an Leit-RNAs immer unwahrscheinlicher wird, dass alle Zielsequenzen gleichzeitig mutieren und das Zielgen trotzdem funktionstüchtig bleibt. Zum anderen kann man eine Zielsequenz auswählen, die in einem hochkonservierten Abschnitt des Erbguts liegt, der eine sehr geringe Toleranz gegenüber Mutationen aufweist. Hochkonservierte DNA-Sequenzen haben eine überlebenswichtige Bedeutung für den Organismus; Veränderungen darin führen sehr häufig zu einem kritischen Funktionsverlust und zum Tod des betroffenen Individuums. In Stechmücken haben Andrea Crisanti vom Imperial College London und sein Team 2018 eine solche Sequenz ausfindig gemacht und einen Unterdrückungs-Drive entwickelt, der auf einem Homing-Element basiert und diese Sequenz zum Ziel hat. Er konnte im Experiment mehrere Moskitopopulationen, die in Käfigen gehalten wurden, zu 100 Prozent vernichten, ohne dass Resistenzen auftraten. Diese Strategie eignet sich allerdings nur für Unterdrückungs-Drives.

Wie aber kann ein Austausch-Drive funktionieren? Etwa mit Hilfe einer Sabotagestrategie, wie sie im bereits erwähnten Medea-System des Reismehlkäfers umgesetzt ist. Auch wenn dieses System bisher molekulargenetisch nicht verstanden ist, gelang es Wissenschaftlern um Bruce Hay

vom California Institute of Technology 2007 erstmals, ein solches System künstlich zu bauen und in Taefliegen anzuwenden. Die gleiche Forschergruppe, zu der mittlerweile einer von uns (Oberhofer) gestoßen ist, hat kürzlich auch eine Medea-Version entwickelt, die auf CRISPR-Cas basiert. Sie funktioniert nicht wie ein Homing-Element, sondern erzeugt gezielt Mutationen an einem anderen Genort, was das Problem der verstärkten Resistenzentwicklung umgeht.

Gift und Gegengift in einem

Das Prinzip dieser neuen Variante ist denkbar einfach: Der CRISPR-Cas-Komplex zerschneidet ein Gen, das für das Überleben des Organismus unerlässlich ist – worauf dieses im Zuge der nichthomologen Endverknüpfung mutiert und seine Funktion verliert. Das »Gegengift« besteht aus einer funktionierenden Version des Gens, deren Nukleotidsequenz aber so verändert wurde, dass der CRISPR-Cas-Komplex sie nicht mehr erkennt und folglich nicht schneidet. Werden die Baupläne für die Genschere und das Gegengift miteinander gekoppelt und ins Genom eingebaut, bilden sie zusammen ein Drive-Element. Ist dieses im Erbgut der mütterlichen Zellen enthalten, dann gibt die Mutter die aktive Genschere über ihre Eizellen an den Nachwuchs weiter. Infolgedessen sammeln sich in sämtlichen Embryonen kontinuierlich Mutationen in dem überlebenswichtigen Gen an, und es wird inaktiviert. Nur jene Nachkommen, die das Drive-Element mit dem Gegengift geerbt haben, überleben – alle anderen sterben, da sie keine funktionierende Kopie des unverzichtbaren Gens besitzen. Damit erhalten alle überlebenden Nach-

kommen das Drive-Element. An dieses lässt sich nun zusätzlich eine weitere Erbanlage koppeln, die dafür sorgt, dass der Organismus keine Krankheitserreger mehr überträgt.

Mit der Anwendung von Gene Drives verbinden sich aber verschiedene Sicherheitsbedenken. So könnten sich die bisher beschriebenen Gene-Drive-Varianten im Prinzip weltweit unkontrolliert ausbreiten, selbst wenn nur eine sehr kleine Anzahl von Individuen freigesetzt wird, deren Erbgut das jeweilige Drive-Element enthält. Ein Unterdrückungs-Drive beispielsweise, der sich gegen eine invasive Art richtet, könnte auf die Heimatregion dieser Spezies überspringen und die dortigen Populationen dezimieren. Selbst wenn es sehr unwahrscheinlich ist, dass ein Gene Drive seine Zielspezies global ausrottet, erscheint dies zumindest theoretisch möglich. Insekten, die Drive-Elemente in sich tragen, halten sich nicht an Ländergrenzen und schleppen ihre Fracht in Nachbarstaaten ein – was die schwierige Frage aufwirft, wer darüber entscheiden soll, wann, wo und ob überhaupt ein Gene Drive eingesetzt werden kann.

Lassen sich solche Bedenken ausräumen? Die oben vorgestellten Gene-Drive-Methoden sind recht kostengünstig, da sie das gewünschte Gen selbst dann in die Zielpopulation eintreiben, wenn nur wenige gentechnisch veränderte Tiere mit Drive-Elementen freigesetzt werden. Sie werden daher als niederschwellig bezeichnet und stehen, etwa hinsichtlich des Einsatzes in Entwicklungsländern, vor keinen großen finanziellen Hürden. Das hat freilich den Preis, dass bereits eine Einschleppung weniger Individuen ausreicht, um einen ungewollten Gene Drive loszutreten. Deshalb arbeiten Forscher parallel an hochschwelligeren Gene Drives. Hier müssen die Tiere, die das jeweilige Drive-Element in sich tragen, die Mehrheit der Population stellen, sonst funktioniert das Eintreiben nicht. Eine solche Methode könnte man regional relativ gefahrlos anwenden: Selbst wenn einige gentechnisch veränderte Individuen in Nachbarregionen auswandern, werden sie nicht die nötige Mehrheit der dortigen Populationen stellen und folglich mit der Zeit wieder verschwinden.

Hochschwellige Gene-Drives erfordern allerdings einen ausgeklügelten molekularen Mechanismus. Eine Möglichkeit ist die Erzeugung eines doppelten »Medea«-Systems (siehe »Prinzip eines hochschwelligen Gene Drive«, links). Hierbei koppeln die Forscher zweimal zwei Gene aneinander. Das erste Kopplungskonstrukt besteht aus einem Gen, das den Bauplan für ein Zellgift A enthält, und einem weiteren Gen mit der Bauanleitung für ein Gegengift gegen B. Das zweite Konstrukt enthält den Plan für das Gegengift A sowie für das Zellgift B. Setzt man gentechnisch veränderte Individuen frei, die diese Konstrukte in ihrem Erbgut tragen, können deren Nachkommen nur überleben, wenn sie entweder beide Genkopplungen geerbt haben oder keines davon. Im ersten Fall bilden sie beide Zellgifte aus, aber auch beide Gegengifte. Im zweiten Fall produzieren sie weder noch.

Tiere, die beide Kopplungskonstrukte auf jeweils beiden homologen Chromosomen tragen, haben keine Probleme, da alle ihre Nachkommen beide Genkopplungen erhalten.

Tiere ohne Kopplungskonstrukt geht es ebenfalls gut, da sie ihren Nachkommen kein Zellgift vererben. Paaren sich Männchen der Wildform jedoch mit Weibchen, die zwar beide Konstrukte besitzen, bei denen die Konstrukte aber jeweils nur auf einem der beiden homologen Chromosomen liegen (Fachleute bezeichnen das als »heterozygot«), sterben im Durchschnitt drei Viertel der Nachkommen. Denn diese erhalten dann von den mütterlichen Zellen zwar beide Gifte, jedoch nicht die genetischen Baupläne für beide Gegengifte. Heterozygote Individuen haben also weniger überlebende Nachkommen, was Genetiker als Unterdominanz-Effekt bezeichnen.

Gene Drives: Regionale Begrenzung dank ausgeklügelten Gendesigns

Unterdominanz hat zur Folge, dass die Medea-Genkonstrukte nur dann in die Population eingetrieben werden, wenn mehr als die Hälfte der Individuen sie in ihrem Genom tragen. Liegt der Anteil der Genträger niedriger, verschwinden ihre Nachkommen allmählich aus der Population. Der Gene Drive bleibt folglich auf Regionen begrenzt, in denen Tiere mit Medea-Konstrukten in großer Zahl freigesetzt werden. Das bietet den Vorteil einer kontrollierbaren Populationsentwicklung, bringt allerdings den Nachteil hoher Kosten für wiederholte Massenfreesetzungen.

Gene Drives könnten künftig eine Möglichkeit bieten, Schädlinge artspezifisch, umweltschonend und kontrollierbar zu manipulieren oder zu bekämpfen. Der potenzielle Nutzen ist gewaltig – man denke nur an die Perspektive, jährlich viele Millionen Malariaerkrankungen zu verhindern. Bevor jedoch erste Anwendungen im Freiland erfolgen, müssen unbedingt Verfahren etabliert werden, Gene Drives zeitlich oder regional zu begrenzen. Gelänge dies, hätten wir Werkzeuge an der Hand, um gezielt gegen Agrarschädlinge und Krankheitsüberträger vorzugehen beziehungsweise invasive Arten zu bekämpfen, die sonst zu verheerenden Umweltschäden führen würden. ◀

QUELLEN

Burt, A.: Site-specific selfish genes as tools for the control and genetic engineering of natural populations. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2003

Esvelt, K.M. et al.: Emerging Technology: Concerning RNA-guided gene drives for the alteration of wild populations. *eLife*, 2014

Karami Nejad Ranjbar, M. et al.: Consequences of resistance evolution in a Cas9-based sex conversion-suppression gene drive for insect pest management. *PNAS* 115, 2018

Oberhofer, G. et al.: Cleave and Rescue, a novel selfish genetic element and general strategy for gene drive. *PNAS* 116, 2019

Wimmer, E.A.: Insect biotechnology: Controllable replacement of disease vectors. *Current Biology* 23, 2013

LITERTURTIPTIP

Burt, A., Trivers, R.: *Genes in conflict: The biology of selfish genetic elements.* Harvard University Press, 2008

Ein Überblick über das Phänomen »egoistischer« Gene, die sich überproportional stark verbreiten

BOTANIK ZAHLENSPIELE IM REICH DER PFLANZEN

Ästhetische gekreuzte Spiralmuster, regelmäßig angeordnete Blätter entlang des Stängels, die geometrische Struktur eines Tannenzapfens – Pflanzen weisen oft komplizierte Formen auf, die Biologen schon lange faszinieren. Nach und nach entschlüsseln Forscher nun dank biophysikalischer Modelle die Mechanismen, die zu diesen erstaunlichen Konstruktionen führen.



Teva Vernoux (links) ist Forschungsleiter am CNRS im Labor für Fortpflanzung und Entwicklung der Pflanzen an der École normale supérieure von Lyon. **Christophe Godin** (Mitte) ist Forschungsleiter und **Fabrice Besnard** Forschungsbeauftragter am Institut national de la recherche agronomique (Inra) im selben Labor.

» spektrum.de/artikel/1693098

A close-up photograph of the leaves of an Aloe polyphylla plant. The leaves are arranged in a dense, overlapping spiral pattern, showing a clear geometric arrangement. The leaves are green with serrated edges and some water droplets are visible on their surfaces. The background is dark, making the green leaves stand out.

AUF EINEN BLICK BOTANISCHE MUSTERBILDUNG

- 1** Pflanzen zieren oft erstaunliche geometrische Muster. Beispielsweise hängt der Winkel zwischen aufeinander folgenden Organen häufig mit dem goldenen Schnitt zusammen.
- 2** Seit einigen Jahren untersuchen Biologen mit Methoden aus der Physik, Mathematik und Informatik verschiedene Mechanismen, die diese außergewöhnlich regelmäßigen Strukturen in Pflanzen erzeugen.
- 3** Offenbar sind winzige Bereiche aus Stammzellen, in denen Organe entstehen, für die ästhetischen Muster verantwortlich. Doch der Prozess läuft vielleicht gar nicht so deterministisch ab, wie bisher angenommen.

Die zahlreichen Blätter der *Aloe polyphylla*, einer in Südafrika heimischen Art, bilden wunderschöne rechts- und linksdrehende Spiralen.

Wen hat die Schönheit von Pflanzen nicht schon einmal berührt? Seit Jahrtausenden faszinieren die oft symmetrisch wirkenden Regelmäßigkeiten viele Menschen. Wie die Blätter – und etwas weiter gefasst jedes andere Organ – einer Pflanze angeordnet sind, beschreibt die so genannte Phyllotaxis.

Die außergewöhnlich vielfältigen Blattstellungen inspirierten etliche Künstler, wie etwa Werke der islamischen Kunst oder des Jugendstils belegen. Aber das ist noch lange nicht alles: Die botanischen Muster weisen auch erstaunliche mathematische Eigenschaften auf, deren biologischen Ursprung Wissenschaftler jetzt allmählich entschlüsseln.

Schon lange suchen Forscher nach Mechanismen, welche die komplexen Geometrien in so vielen unterschiedlichen Pflanzen erzeugen. Sie wollen verstehen, wie die regelmäßigen Muster auf molekularer Ebene entstehen und sich dann über die ganze Pflanze ausbreiten. Dazu kombinieren sie seit mehr als 200 Jahren Methoden aus der Mathematik, Physik, Informatik und Biologie. Doch erst in den vergangenen 20 Jahren machten sie bedeutende Fortschritte auf dem Gebiet. Im letzten Jahrzehnt haben verschiedene interdisziplinäre Forschungsgruppen, darunter auch unsere, neueste Ansätze aus der Molekularbiologie mathematisch modelliert, um die Musterbildung näher zu beleuchten.

Wozu die schönen Muster?

Evolutionär begründen lässt sich die Phyllotaxis mit verbesserter Lichtausbeute: Wenn die Blätter sich kaum überdecken, können sie möglichst viel Sonnenlicht aufnehmen. Doch diese einfache Erklärung hält nicht lange stand. Etliche Pflanzen zeigen beispielsweise Phyllotaxen, bei denen die Blätter übereinandergeschichtet sind und sich gegenseitig beschatten. Außerdem bestimmt die Phyllotaxis nur, wo die Blätter aus dem Stängel dringen. Bei den meisten Pflanzen orientieren sich die Blätter aber zu einer Lichtquelle, indem sie sich drehen oder biegen. Darüber hinaus ist es nicht für alle Pflanzen vorteilhaft, sich der Sonne voll auszusetzen, vor allem bei Trockenheit. Das obige Argument kann zudem nicht erklären, warum andere Elemente, die keine Fotosynthese betreiben, wie Schuppen von Zapfen, Röhrenblüten (kleine Einzelblüten) oder Blütenorgane (außer den Kelchblättern) ebenfalls regelmäßig angeordnet sind.

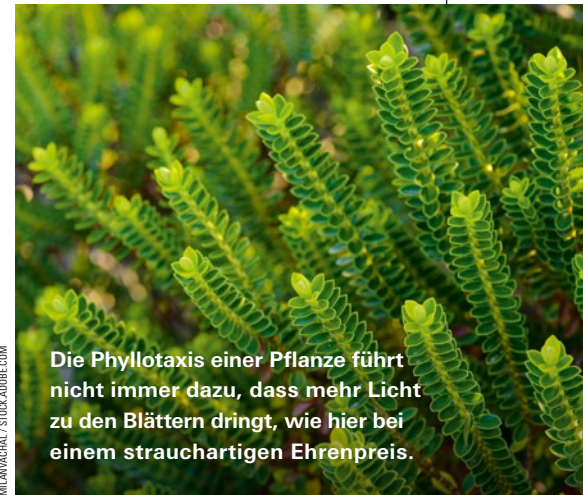
Biologen kamen daher mit allerlei weiteren Erklärungsversu-

Die wichtigsten Phyllotaxis-Typen, charakterisiert durch die Zahl j der Organe, die aus demselben Knoten der Sprossachse entspringen, sowie durch den Divergenzwinkel δ zwischen aufeinander folgenden Organen.

chen auf. Der englische Mediziner Hubert Airy (1838–1903) vermutete beispielsweise 1873, dass die gleichmäßigen Strukturen junge Organe vor äußerem Stress schützen, der etwa durch Temperaturänderungen oder Verletzungen verursacht wird.

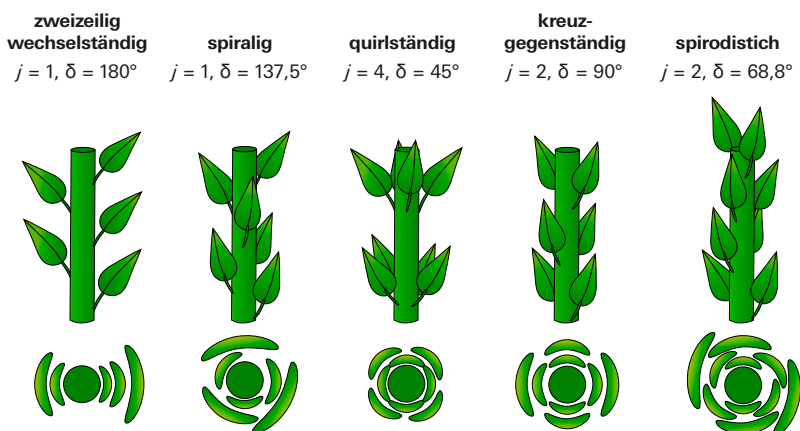
Solche Hypothesen sind allerdings experimentell schwer zu belegen. Verschiedene Phyllotaxen lassen sich kaum miteinander vergleichen oder modifizieren, ohne dass sich gleichzeitig auch andere Eigenschaften der Pflanze ändern – ganz zu schweigen davon, dass die genaue Messung selektiver Anpassungen extrem schwierig ist.

Eine andere mögliche Erklärung wäre, dass die geometrischen Muster indirekt entstehen, während die Pflanze wächst. Damit wären sie keine direkte Folge einer evolutionären Selektion. Und tatsächlich



Die Phyllotaxis einer Pflanze führt nicht immer dazu, dass mehr Licht zu den Blättern dringt, wie hier bei einem strauchartigen Ehrenpreis.

scheint die komplizierte Organbildung der Pflanzen viele geometrische Eigenschaften der Phyllotaxen zu belegen. Das schließt jedoch nicht aus, dass die regelmäßigen Strukturen Vorteile bringen, wodurch sich ein bestimmter Mechanismus zur Organentstehung durchgesetzt hat.



PIOUR LA SCIENCE, AUGUST 2018, IMAH, FABRICE BESNARD

Eine wichtige Rolle spielt dabei ein winziger Bereich – kleiner als ein Stecknadelkopf – an den Sprossspitzen einer Pflanze, das so genannte Meristem. Dieser spezielle Gewebetyp besteht aus Stammzellen und produziert neue Organe (siehe »Meristem, goldener Winkel und Modellierung«, S. 57), die in der Nähe seines Zentrums entstehen. Während der Stängel wächst und die Organe dadurch größer werden, bilden sich die regelmäßigen Muster aus, die man mit bloßem Auge erkennen kann. In dieser Phase verändern die Organe kaum noch ihre Anordnung. Das heißt, die Phyllotaxis einer Pflanze ist bereits sehr früh festgelegt, sobald die Organe erstmals im Meristem erscheinen.

Um die außergewöhnlichen Strukturen einer Pflanze zu verstehen, muss man herausfinden, wie genau das Meristem die Organe erzeugt. Biologen näherten sich dieser schwierigen Aufgabe, indem sie zunächst die verschiedenen geometrischen Muster untersuchten, wodurch sie erstaunliche Eigenschaften enthüllten.

Dazu klassifizieren sie die verschiedenen Phyllotaxen der Pflanzen durch zwei einfache Kriterien: die Anzahl der Elemente an einem Knoten, also am selben Abschnitt der Sprossachse, sowie den Winkel zwischen zwei aufeinander folgenden Organen, den so genannten Divergenzwinkel. Dadurch lassen sich vier große Phyllotaxis-Typen definieren: die wechselständigen, die spiraligen (oder schraubigen), die wirtel- oder quirlständigen und die zweizeilig schraubigen (oder spirodistischen) Phyllotaxen.

Bisherige Studien deuten darauf hin, dass spiralige Blattstellungen am verbreitetsten sind. In diesen Anordnungen tauchen meist mehrere spiralförmige Muster auf. Eines davon verbindet die Organe vom jüngsten zum ältesten, in der Reihenfolge ihrer Entstehung. Diese Generationenspirale windet sich vertikal um die Sprossachse, Blatt um Blatt, wie die Stufen einer Wendeltreppe.

Die erstaunliche Mathematik der Pflanzenwelt

In Strukturen wie Pinienzapfen, deren Schuppen dicht gepackt sind, kann man weitere Spiralen ausmachen, die sich mal mit und mal gegen den Uhrzeigersinn drehen. Der deutsche Botaniker Alexander Braun (1805–1877) machte 1831 eine überraschende Entdeckung, als er bei verschiedenen Pflanzen die unterschiedlich gewundenen Spiralen zählte. Denn wie sich herausstellte, nehmen deren Anzahl keine zufälligen Werte an (siehe »Goldener Schnitt: Wissenschaftliche Realität oder subjektive Konstruktion?«, S. 56): Es handelt sich immer um zwei nachfolgende Zahlen der Fibonacci-Folge, deren Glieder sich aus der Summe der zwei vorhergehenden ergeben:

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, ...

Benannt ist die unendliche Zahlenfolge nach Leonardo da Pisa (um 1170–1240), auch Leonardo Fibonacci genannt, der sie bereits im 13. Jahrhundert erforschte. Sie besitzt viele bemerkenswerte mathematische Eigenschaften. Besonders interessant ist die Folge der Quotienten aus aufeinander folgenden Fibonacci-Zahlen (F_{n+1}/F_n):

1/1, 2/1, 3/2, 5/3, 8/5, ...

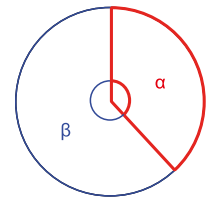
Denn anders als die Fibonacci-Folge konvergiert diese gegen einen endlichen Wert: $(1 + \sqrt{5})/2$ (etwa 1,618), den

Kurz erklärt

Phyllotaxis (griechisch phyllon = Blatt, taxis = Anordnung) bezeichnet die Anordnung von Pflanzenorganen wie Blättern, Ästen, Knospen, Schuppen, Früchten, Blüten, Blütenblättern oder Staubgefäßen um eine Sprossachse.

Beim **Meristem** (griechisch meristos = geteilt) handelt es sich um undifferenziertes Pflanzengewebe, das teilungsfähig ist und sich somit zu neuem Gewebe oder neuen Organen entwickeln kann.

Der **goldene Winkel** ist der kleinere der zwei komplementären Winkel α und β , die den Kreisumfang im goldenen Schnitt teilen. Die Definition setzt voraus, dass $\beta/\alpha = \Phi$ (goldener Schnitt) und dass der goldene Winkel $2\pi/(1+\Phi)$, also etwa 137,5 Grad, beträgt.



POUR LA SCIENCE/AUGUST 2018

goldenen Schnitt Φ . Jahrhundertlang tauchte diese Zahl immer wieder in Abhandlungen über Architektur, Kunst und sogar Musik auf und wurde als harmonische, ja nahezu göttliche Proportion angesehen.

Auch in der Botanik trifft man auf den goldenen Schnitt. Insbesondere wenn man den Divergenzwinkel zwischen zwei nacheinander auftretenden Organen in einer spiraligen Blattstellung untersucht: Dieser beträgt durchschnittlich 137,5 Grad. Multipliziert man ihn mit dem Zahlenwert des goldenen Schnitts, erhält man 222,5 Grad – also den dazu komplementären Winkel (die Summe beider beträgt 360 Grad)! Entsprechend bezeichnet man einen Winkel von 137,5 Grad auch als »goldenen Winkel« (siehe »Kurz erklärt«, oben).

Mathematisch lässt sich zeigen, dass verschiedene Spiralmuster entstehen, wenn die Organe um jeweils den goldenen Winkel gegeneinander verdreht sind. Zählt man, wie viele sich mit und gegen den Uhrzeigersinn drehen, ergeben sich daraus stets zwei konsekutive Fibonacci-Folgliedern.

So drehen sich bei einem Pinienzapfen in der Regel 8 Spiralen in die eine Richtung und 13 in die andere. Bei einer Margerite lassen sich dagegen 21 beziehungsweise 34 Spiralen erkennen (siehe »Goldener Schnitt: Wissenschaftliche Realität oder subjektive Konstruktion?«, S. 56).

Aber wie können die Zellen im Meristem so präzise den Ort und die Zeit festlegen, an dem sich ein neues Organ bildet? Bereits im 19. und 20. Jahrhundert spekulierten Wissenschaftler über die möglichen Mechanismen, die zu den verschiedenen Phyllotaxen führen. Die mikroskopischen Vorgänge, die sich tief verborgen in der Pflanze in der Nähe des Meristems abspielen, waren damals experimentell noch unerreichbar. Dennoch gelang es den For-

Goldener Schnitt: Wissenschaftliche Realität oder subjektive Konstruktion?

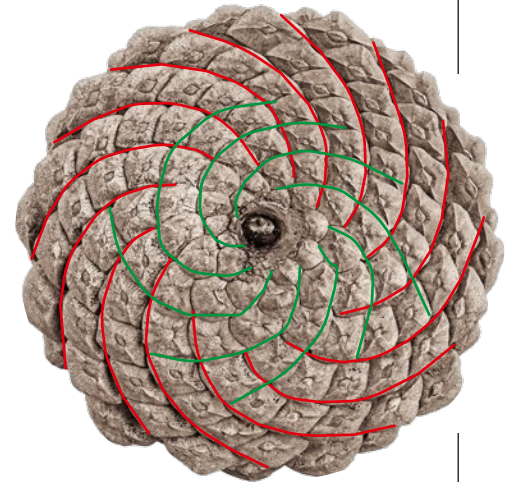
Die spiralförmigen Blattstellungen hängen auf mindestens zwei Arten mit der Fibonacci-Folge zusammen: durch die Anzahl der Spiralen, die sich im und gegen den Uhrzeigersinn drehen (siehe Bilder), sowie durch den goldenen Winkel (siehe » Meristem, goldener Winkel und Modellierung«, rechts). Diesen

Die Margerite besitzt eine spiralförmige Phyllotaxis vom Typ (21, 34): Ihre Röhrenblüten stehen zu 21 Spiralen in eine (grün) sowie zu 34 in die andere Richtung (rot). Die Zahlen entsprechen zwei aufeinander folgenden Gliedern der Fibonacci-Folge.

kennt man auch aus ganz anderen Zusammenhängen, etwa aus der antiken Architektur oder bei Gemälden der Meister des Cinquecento. In der Biologie findet man den goldenen Schnitt bei den Schalen von Perlbooten oder in den Proportionsverhältnissen zwischen verschiedenen Teilen des menschlichen Körpers.

Allerdings sollte man aufpassen. Häufig ergibt sich der Zahlenwert nur aus groben Rundungen, willkürlichen Ausgrenzungen oder Verzerrungen der Probenauswahl. Schließlich ist es nicht sehr schwer, einen Quotienten zu finden, der ungefähr 1,6 beträgt. Häufig wird argumentiert, der gemessene Wert weiche wegen Messungenauigkeiten leicht vom goldenen Schnitt ab. Genauso verhält es sich mit dem Divergenzwinkel der Phyllotaxis: Misst man ihn bei der Ackerschmalwand, kommt man selten auf die exakte Zahl 137,5 Grad. Erst der Durchschnitt aller Winkel ergibt den erwarteten Wert.

Bei den links- und rechtsdrehenden Spiralen der Pflanzen bleibt dagegen kein Zweifel. Hier handelt es



Der Pinienzapfen weist eine spiralförmige Phyllotaxis des Typs (8, 13) auf: Seine Schuppen zeichnen 8 Spiralen in eine (grün) und 13 in die andere Richtung (rot) – abermals zwei aufeinander folgende Zahlen der Fibonacci-Folge.

sich um ganze Zahlen, die sich nicht runden oder ungenau messen lassen. Unseres Wissens nach ist das die einzige biologische Größe, die zweifellos mit der Fibonacci-Folge und dem goldenen Schnitt zusammenhängt.

schern, einige spannende Zusammenhänge offenzulegen, indem sie sich auf makroskopische Versuche stützten.

So lassen beispielsweise mehrere Beobachtungen darauf schließen, dass der Divergenzwinkel zwischen zwei Organen nicht genetisch festgelegt ist. Denn innerhalb derselben Art können unterschiedliche Phyllotaxen auftauchen. Zum Beispiel gibt es unter Sonnenblumen einige mit einem goldenen Divergenzwinkel und andere, bei denen er 99,5 Grad beträgt. Zählt man die darin vorkommenden Spiralen, entspricht deren Anzahl den Folgengliedern der Lucas-Folge, einer speziellen Variante der Fibonacci-Folge. Die genaue Anordnung der Organe scheint daher spontan zu entstehen. Das verdeutlichen Pflanzen, die an unterschiedlichen Zweigen verschiedene Blattstellungen aufweisen. Bei einigen kann das Meristem sogar plötzlich die Phyllotaxis ändern.

Durch gezielte Laborversuche bestätigten die beiden britischen Botaniker Mary und George Snow in den 1930er Jahren die Hypothese, dass die Phyllotaxis nicht genetisch bestimmt ist. Dazu störten sie die Funktion des Meristems

mehrerer Pflanzen mit mikrochirurgischen Eingriffen. In einem ihrer Schlüsselexperimente teilten sie das Meristem an der Sprossachse eines zottigen Weidenröschens (*Epilobium hirsutum*), dessen Blätter normalerweise gegenständig angeordnet sind. Die beiden Meristemhälften wuchsen unabhängig voneinander weiter, doch plötzlich wies die Pflanze eine spiralförmige Blattstellung auf.

Aus diesem und ähnlichen Versuchen lässt sich schließen, dass der gleiche Mechanismus die verschiedenen Phyllotaxen erzeugt. Demnach führen Anzahl und Position der bereits vorhandenen Organe sowie ihre Wechselwirkungen untereinander zu einem bestimmten Muster. Die dazugehörige Grundidee kann man einfach zusammenfassen: An einer Stelle in der Nähe des Meristems entsteht immer dann ein neues Organ, wenn es ausreichend Platz dafür gibt.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelten Forscher zahlreiche Modelle, die dieses selbstorganisierende Prinzip widerspiegeln. Dabei zeichnete sich immer stärker ab, dass junge Organe die Entstehung neuer Ele-

mente in ihrer unmittelbaren Nähe unterdrücken, indem sie ein Signal abgeben. Die Überlagerung aller Signale lässt sich als Hemmfeld modellieren, das bestimmt, wann und wo sich die nächsten Organe ausbilden.

Als die Physiker Yves Couder und Stéphane Douady von der École normale supérieure in Paris zu Beginn der 1990er Jahre kleine Tropfen aus flüssigem Metall in Magnetfeldern beobachteten, erkannten sie, dass die Flüssigkeit die gängigsten Phyllotaxis-Typen nachbildet. Couder und Douady arbeiteten daraufhin ein physikalisches Modell aus, welches das wachsende Meristem als dynamisches System behandelt. Demnach können präzise Divergenzwinkel entstehen, ohne dass sie vorher (etwa genetisch) festgelegt sind. Stattdessen bestimmen die hemmenden Mechanismen der Pflanze, wann und wo sich neue Organe ausbilden.

Erstaunlicherweise erklärt das Modell alle beobachteten Phyllotaxen – sowohl die verbreitetsten Typen (siehe »Wo zu die schönen Muster?«, S. 54) als auch seltenere Muster. Zudem beschreibt es, wie verschiedene Phyllotaxen ineinander übergehen, sei es auf natürliche Weise oder durch Störungen des Meristems wie bei Mary und George Snow.

Ein einziges Modell für alle Blattstellungen

Im Ansatz von Couder und Douady bestimmt ein einziger geometrischer Parameter, $\Gamma = d/R$, die Anordnung der Organe einer Pflanze. Dabei steht d für die Reichweite des Hemmfelds, das von jedem Organ ausgeht, und R entspricht dem Radius der zentralen Zone des Meristems, in der sich kein neues Organ bilden kann (siehe »Meristem, goldener Winkel und Modellierungen«, rechts).

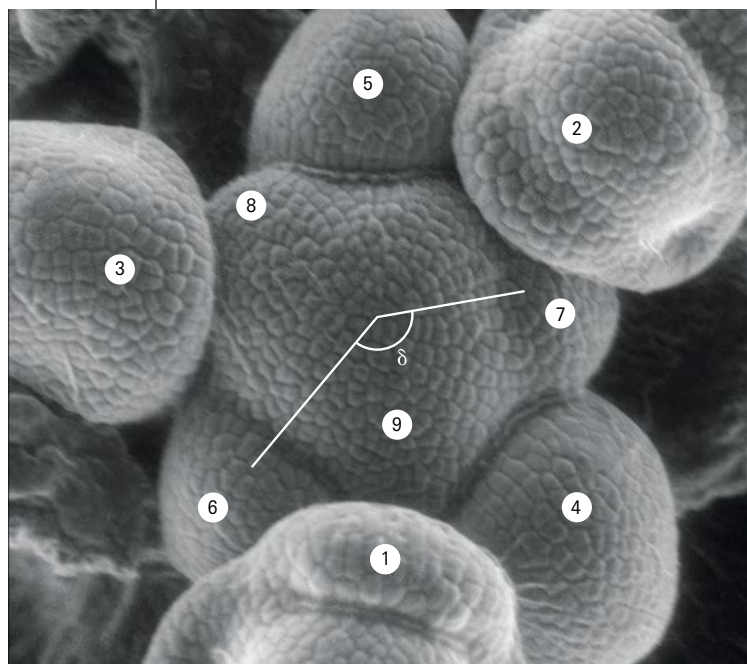
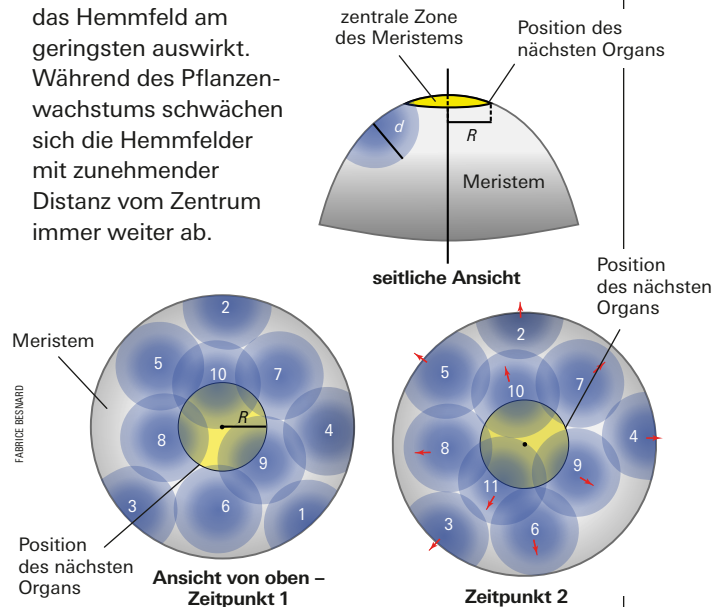
Bei einer sehr jungen Sprossachse ist das Meristem anfangs klein und damit auch der Radius R , so dass sich der Parameter Γ vergrößert. Wenn das erste Organ ein starkes Hemmfeld erzeugt, wird das nächste wahrscheinlich auf der gegenüberliegenden Seite entstehen, also um 180 Grad versetzt. Während das Meristem wächst, nimmt R zu und Γ folglich ab. Das nächste Organ erscheint dann nicht um genau 180 Grad zum vorhergehenden versetzt, weil es das Feld des ersten Organs auch noch spürt.

Während die Pflanze wächst und Γ dabei immer kleiner wird, bilden sich Organe innerhalb eines Winkels von $2\pi(1 - 1/b)$ aus, wobei b ein Element aus der Folge der Quotienten von Fibonacci-Zahlen ist. Weil die entsprechende Folge gegen den goldenen Schnitt Φ konvergiert, nähert sich der Divergenzwinkel dem goldenen Winkel $2\pi(1 - 1/\Phi)$. Diesem geometrisch determinierten Modell zufolge führen also das Pflanzenwachstum, das Γ verkleinert, und die geometrischen Eigenschaften des Meristems zu den erstaunlichen botanischen Mustern.

Gegen Ende des 20. Jahrhunderts akzeptierten die meisten Wissenschaftler das Modell der beiden Physiker Douady und Couder, das auf zwei einfachen Bausteinen basiert: einem Zentrum, das keine Organe produzieren kann, und Organen, die das

Meristem, goldener Winkel und Modellierung

Ein Meristem (im unteren Bild das Apikalmeristem der Ackerschmalwand) ist eine Ansammlung von Stammzellen, die sich während des gesamten Lebens einer Pflanze stets erneuern und Organe bilden. Bei einer spiralgigen Phyllotaxis, wie hier dargestellt, beträgt der Divergenzwinkel δ zwischen zwei Organen durchschnittlich 137,5 Grad, was etwa dem goldenen Winkel entspricht. Dies lässt sich theoretisch durch Modelle nachbilden, in denen jedes neue Organ (nummeriert vom ältesten, 1, zum jüngsten, 11) ein Hemmfeld mit dem Wirkungsbereich d um sich herum erzeugt (violette Scheiben) und in denen im Radius R um das Zentrum eines Meristems kein Organ entstehen kann. Jedes neue Organ erscheint an einer Stelle am Rand der zentralen Zone, wo sich das Hemmfeld am geringsten auswirkt. Während des Pflanzenwachstums schwächen sich die Hemmfelder mit zunehmender Distanz vom Zentrum immer weiter ab.



Wachstum neuer Elemente in der unmittelbaren Nähe unterdrücken.

Auch wenn es viele Beobachtungen erklärt, lässt das Modell einige grundlegende Fragen unbeantwortet. Es bleibt beispielsweise unklar, woraus die Hemmfelder bestehen. In den letzten 15 Jahren machten Biologen diesbezüglich große Fortschritte, unter anderem indem sie die Blütenbildung der Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) untersuchten, die sich im Labor leicht kultivieren lässt.

Überraschenderweise fanden Biologen erste Hinweise auf einen hemmenden Mechanismus, als sie ein Aktivierungssignal identifizierten. Cris Kuhlemeier und seine

Kollegen von der Universität Bern konnten im Jahr 2000 zeigen, dass bei der Ackerschmalwand und der Tomate die Indol-3-Essigsäure, ein pflanzliches Hormon aus der Gruppe der Auxine, neue Organe bildet. Das Auxin kann sich dank Transportproteinen, die das Molekül durch die Zellmembranen schleusen, frei in der Pflanze bewegen. Als Kuhlemeier und sein Team diesen Transport unterbanden, bildete die Ackerschmalwand keine Blüten mehr. Trugen sie das Auxin danach jedoch lokal auf, entstanden Blüten.

Biologen gehen daher davon aus, dass sich das Auxin lokal häufen muss, um ein neues Organ auszubilden. Demnach könnten junge Blüten die Indol-3-Essigsäure so stark

Die Phyllotaxis der Moose

Neben Blütenpflanzen weisen auch Moose eine vielfältige Phyllotaxis auf. Diese landlebenden Gewächse entstanden vor 340 bis 440 Millionen Jahren und sind damit wesentlich älter als Blütenpflanzen, deren Ursprung nur etwa 200 bis 245 Millionen Jahre zurückreicht.

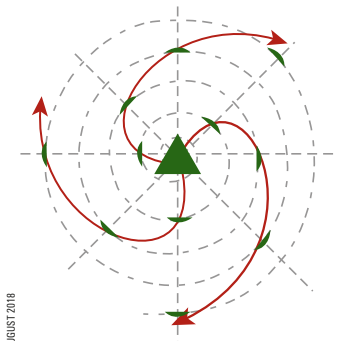
Der gemeinsame Vorfahre beider Gruppen besaß vermutlich noch keine Blätter. Forscher gehen davon aus, dass diese bei Moosen und Blütenpflanzen unabhängig voneinander entstanden. In beiden haben sich derartige Organe offenbar evolutionär durchgesetzt, weil sie Lichtenergie optimal einfangen, die sie für die Photosynthese benötigen. Moose und Blütenpflanzen ähneln sich aber ebenso in anderen Merkmalen, etwa in der regelmäßigen Anordnung ihrer Blätter. Allerdings besteht das Meristem von Moosen aus einer einzigen Zelle, gegenüber einigen hundert in Blütenpflanzen.

Jedes Mal, wenn sich im Moos die Meristemzelle teilt, bleibt eine davon an der Spitze der Sprossachse, während sich die andere zu einem Blatt entwickelt. Die Anordnung der Blätter ist daher vorwiegend durch die Form der meristemalen Zelle und die Lage ihrer Teilungsebene festgelegt. Wie bei Blütenpflanzen führt bei Moosen die rhythmische Produktion von Blättern zu einer regelmäßigen Phyllotaxis, die entweder spiralig oder wechselständig ist.

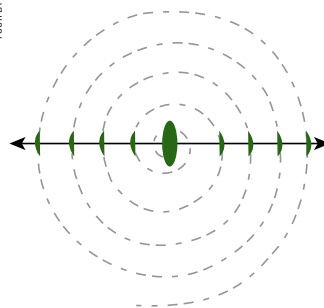
Die Mechanismen, die in den verschiedenen Pflanzengruppen die auffallenden Muster erzeugen, scheinen sich stark zu unterscheiden: In Blütenpflanzen sind es Hemmfelder, während sich bei Moosen die Form und Lage der Zellteilung entscheidend auswirkt. Allerdings könnten die molekularen

Signale, bei Blütenpflanzen die Phyllotaxis kontrollieren, auch eine Rolle bei Moosen spielen, da man in ihnen die gleichen Pflanzenhormone findet.

Yoan Goudert ist Biologe am Laboratoire Reproduction et Développement des Plantes an der École normale supérieure de Lyon.



POUR LA SCIENCE/AUGUST 2018



Bei Moosen besteht das Meristem aus einer einzigen Zelle. Je nachdem, welche Form sie annimmt und wo die Teilungsebene verläuft, bilden die Blätter eine spiralige Phyllotaxis, wie beim Goldenen Frauenhaarmoos (*Polytrichum commune*, oberes Bild), oder eine zweizeilig wechselständige, etwa beim Eibenblättrigen Spaltzahnmoos (*Fissidens taxifolius*, unten).

CHMIEZ / (COMMONS WIKIMEDIA.ORG/WIKIFILEPOLYTRICHUM_COMMUNE_IN_NATURAL_MONUMENT_KNEZ_U_HRAZAN_11.JPG) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVCOMMONS.ORG/LICENSING/RS/SA/3.0/LEGALCODE)

HERMANSCHÄPNER / (COMMONS WIKIMEDIA.ORG/WIKIFILE:FISSIDENS_TAXIFOLIUS_144714-4810891-2776.JPG) / CC0 (CREATIVCOMMONS.ORG/PUBLICDOMAINZER0/D/LEGALCODE)

sammeln, dass die Zellen in ihrer Nachbarschaft leer ausgehen und dadurch keine Organe produzieren. Um diesen Verdacht zu überprüfen, verbanden weltweit mehrere Teams biologische Studien mit mathematischen Modellen (siehe »Die Moleküle der Phyllotaxis«, rechts).

All diese Prozesse finden in der Epidermis statt, der äußersten Zellschicht der Pflanze. Um sich vom überschüssigen Auxin zu befreien, leiten die jungen Organe das angesammelte Hormon in die inneren Gewebeschichten ab. Während sie wachsen, entfernen sich die Blüten vom Meristem, so dass sie nicht mehr mit den jüngeren Organen um das Auxin konkurrieren. Forscher beobachteten diesen Mechanismus auch bei anderen Pflanzen, die evolutiv recht weit von der Ackerschmalwand entfernt sind, etwa bei der Tomate, dem Mais oder der Gerste.

Ein einziges Molekül dient also offenbar gleichzeitig als Aktivator und Hemmstoff. Doch die Realität scheint wesentlich komplizierter zu sein. Zunächst weiß man immer noch nicht, was die Transportproteine veranlasst, an einigen Stellen das Auxin anzuhäufen und an anderen zu entfernen. Dazu gibt es verschiedene Vermutungen. Die Transporter könnten sich beispielsweise an der höchsten Auxinkonzentration orientieren oder sie sorgen dafür, dass der Fluss des Hormons maximal ausfällt.

Welche Rolle spielt die Mechanik?

Aber nicht nur chemische Mechanismen könnten das Wachstum der Pflanze und ihrer Organe beeinflussen, sondern auch mechanische Prozesse. Pflanzliche Zellen stehen wegen der sie umgebenden starren Wand und des Wassers, das sie speichern, unter Druck. Zudem erzeugt die Form des Gewebes Spannungen, welche die Moleküle im Zytoskelett stören. Diese großen Polymere kontrollieren wiederum die Form der Zellen.

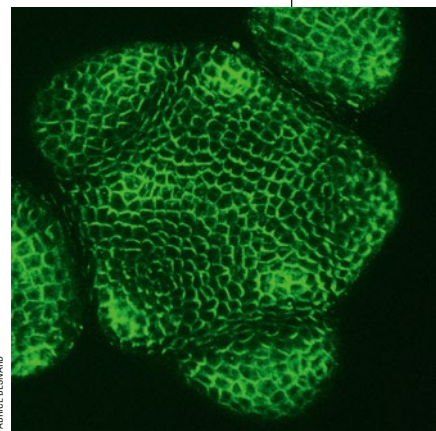
Während das Gewebe also wächst und sich verformt, reagieren die Zellen und ihr Zytoskelett auf diese neuen Spannungen, indem sie die Eigenschaften der Zellwände (etwa Festigkeit und Richtung des Wachstums) anpassen, was im Gegenzug die mechanischen Kräfte verändert. So entstehen komplexe mechanische Wechselwirkungen im wachsenden Gewebe. Man konnte zwar noch nicht direkt nachweisen, dass diese Prozesse die Anordnung der neuen Organe beeinträchtigen, doch wie unter anderem unsere Forschungsgruppe herausfand, deuten experimentelle Ergebnisse zumindest bei der Ackerschmalwand darauf hin.

Zusammen mit anderen Teams erforschten wir dazu Mutationen, bauten gezielt genetische Veränderungen ein und beobachteten das Zellwachstum auf mikroskopischer Ebene. Es zeigte sich, dass das angesammelte Auxin die Zellwandsynthese fördert sowie das Wachstum der Zelle unterstützt. All diese Prozesse sind offenbar notwendig, damit sich Blätter oder Blüten entwickeln.

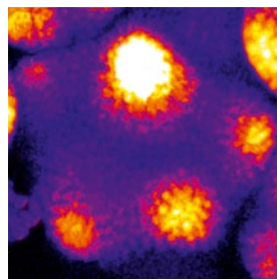
Nun hatten wir chemische und mechanische Kräfte identifiziert, welche die Phyllotaxis einer Pflanze prägen. Eine weitere Entdeckung ließ uns allerdings vermuten, dass darüber hinaus noch andere Mechanismen beteiligt sind. Nach langer Suche hatten wir nämlich doch einen Hemmstoff gefunden, der sich um die wachsenden Organe einer Pflanze verteilt. Dabei handelt es sich um das Molekül

Die Moleküle der Phyllotaxis

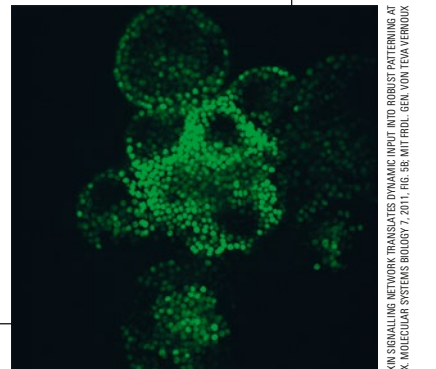
Im Meristem prägen mehrere Moleküle Ort und Zeitpunkt, an denen das nächste Organ entsteht. Ein Hormon aus der Gruppe der Auxine häuft sich in den neuen Organen (Bild unten rechts, sichtbar gemacht durch einen fluoreszierenden Biomarker) dank bestimmter Transportproteine an, die das Auxin durch die Zellmembran (Bild oben) schleusen. Ohne Auxin bildet sich kein Organ. Durch die Anhäufung des Hormons an einer Stelle wird es der unmittelbaren Umgebung entzogen. Ein weiteres Protein, AHP6, sammelt sich ebenfalls in den Bereichen späterer Organe an (unten links). Solange es sich dort in ausreichender Konzentration befindet, hemmt es die Aktivität des Hormons Zytokinin, wodurch sich das Wachstum verzögert. Diese beiden Mechanismen führen dazu, dass die Organe in regelmäßigen Abständen entstehen.



FABRICE BESNARD



FABRICE BESNARD



VERNOUX, T. ET AL.: THE AUXIN SIGNALING NETWORK TRANSACTS DYNAMIC INPUT INTO ROBUST PATTERNING AT THE SHOOT APICE. MOLECULAR SYSTEMS BIOLOGY 7, 2011, FIG. 3B. MIT FRIEDRICH VON TEJAN VERNOUX

AHP6 (Arabidopsis histidine phosphotransfer protein 6), das die Aktivität von Zytokinin unterdrückt, einem weiteren Pflanzenhormon (siehe »Die Moleküle der Phyllotaxis«, oben). Erstaunlicherweise beeinflusst das von AHP6 erzeugte Feld nicht den Divergenzwinkel, sondern zwingt der Pflanze vielmehr einen regelmäßigen Rhythmus auf, in dem sie die Organe bildet. Dank dieses Moleküls sind die Blätter entlang der Sprossachse extrem gleichmäßig verteilt.

Offenbar setzt sich das Hemmfeld also aus mehreren Komponenten zusammen. Neben dem Auxin sind auch andere Faktoren an den regelmäßigen mathematischen Mustern beteiligt. Diese Zusammenhänge sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

Während sich die meisten Biologen auf die Natur der Hemmfelder konzentrierten, rückten andere ungeklärte Fragen in den Hintergrund. Unsere Modelle können bei-

Permutationen, Sprossachsenlänge oder die Bildungsrate der Organe zu untersuchen. Viele Wissenschaftler versuchen derartige Messungen zu automatisieren, denn sie sind unverzichtbar, um die Phyllotaxis nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ zu verstehen.

Eine weitere Hürde besteht darin, die oftmals abstrakten Kontrollparameter eines theoretischen Modells mit experimentellen Größen zu verbinden. Beispielsweise lässt sich die Stärke eines Hemmfelds nur schwer im Labor messen. Um solche Parameter zu bestimmen, muss man zumindest einige der vielen molekularen Abläufe kennen.

Wenn man beispielsweise annimmt, dass das Auxin die Stärke der Hemmfelder bestimmt, kann man die Hormonzkonzentration im Meristem messen. Zu diesem Zweck entwickelte unsere Forschungsgruppe 2012 einen neuen Biosensor (ein fluoreszierendes Protein, das sensibel auf Auxin reagiert, siehe » Die Moleküle der Phyllotaxis«, S. 59), der empfindlich genug ist, um die Auxinkonzentrationen extrem genau abzubilden. Indem man den Sensor mit anderen Markern koppelt, welche die Aktivität und Zelldifferenzierung messen, kann man zeitlich verfolgen, wie das Meristem hemmende Signale räumlich verteilt. Diese neuen experimentellen Möglichkeiten der Molekularbiologie könnten künftig zu genaueren theoretischen Modellen führen, die uns hoffentlich dabei helfen werden, die erstaunliche phyllotaktische Vielfalt der Pflanzenwelt besser zu verstehen. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/wunderwelt-der-pflanzen



ISTOCK / SUITANDICEKIL

QUELLEN

Besnard, F. et al.: Cytokinin signalling inhibitory fields provide robustness to phyllotaxis. *Nature* 505, 2014

Brunoud, G. et al.: A novel sensor to map auxin response and distribution at high spatio-temporal resolution. *Nature* 482, 2012

Golé, C. et al.: Fibonacci or quasi-symmetric phyllotaxis. Part I: Why? *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 85(4), 2016

Refahi, Y. et al.: A stochastic multicellular model identifies biological watermarks from disorders in self-organized patterns of phyllotaxis. *eLife* 5, 2016

Vernoux, T. et al.: The auxin signalling network translates dynamic input into robust patterning at the shoot apex. *Molecular Systems Biology* 7, 2011

Spektrum Leserreisen

Polarlicht-Reise Nordfinnland

Auf dieser Reise vom 21. bis 26. September 2020 in einen wunderschönen Teil Nordfinnlands stehen Beobachtung und Fotografie der Polarlichter sowie Vorträge über Astronomie im Vordergrund. Sie entdecken die einmalige Landschaft Finnisch-Lapplands, die durch unberührte Wälder, stille Natur und zahlreiche Seen und Flüsse geprägt ist. Traumhafte Ausblicke erwarten Sie im größten Nationalpark Finnlands. Mit etwas Glück können Sie spektakuläre Polarlichter beobachten!

www.glur.ch/ch/leserreise-spektrum-der-wissenschaft

Mit dem Code »Spektrum« bei Buchung dieser Reise erhalten »Spektrum«-Abonnenten für sich und maximal eine mitreisende Person einen Rabatt von fünf Prozent auf den Reisepreis (Zusatzleistungen ausgeschlossen).

Infos und Anmeldung:

Spektrum.de/live

Spektrum LIVE

Veranstaltungen des Verlags
Spektrum der Wissenschaft

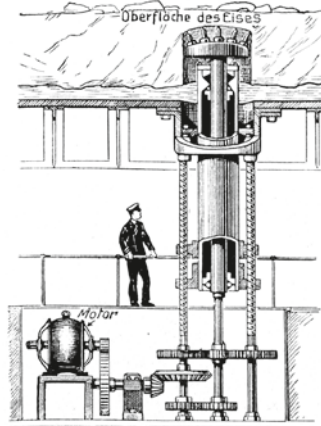


Wissenschaft vor 100 und vor 50 Jahren – aus Zeitschriften der Forschungsbibliothek für Wissenschafts- und Technikgeschichte des Deutschen Museums

PER U-BOOT-BOHRER AUF'S POLAREIS

»Den Kampf um die Erdpole [führte man] mit dem Erfolg, daß der Nordpol wie der Südpol endlich erreicht wurde. Noch ist aber die Polarforschung nicht am Ende angelangt; ist doch die Hauptaufgabe die Erkundung der polaren Natur. Der Amerikaner Simon Lake hat nämlich den Plan eines Polarunterseebootes entworfen. Beim Bau ist zu beachten, daß selbst im Winter eisfreie oder höchstens mit einer

dünnen Eiskruste überdeckte Stellen vorhanden sind. Lake gedenkt, das Boot mit einer Vorrichtung zu versehen, um beim Auftauchen dünnere Eisschichten zu durchstoßen. Diese Vorrichtung stellt einen nach oben hervorschiebbaren Zylinder dar, durch den man einen Eisbohrer gegen die Eisdecke arbeiten läßt.« *Kosmos 2, S. 51–52*



Skizze des U-Boot-Bohrers.

SALZSÄURETEST ERKENNT GLASART

»Für die Aufbewahrung von Getränken aller Art muß das Glas eine bestimmte Zusammensetzung besitzen, damit die Getränke nicht in ihrer Güte leiden. Gutes Glas soll neben der Kieselsäure mindestens 2 Metalloxyde, darunter ein Alkali enthalten, und dabei keinen zu hohen Kalkgehalt zeigen. Übersteigt letzterer 20%, so wird das Glas angreifbar durch organische Säuren, sodaß die Getränke bei längerem Lagern benachteiligt werden müssen. Das Glas läßt sich prüfen, wenn man es den Dämpfen von konzentrierter Salzsäure aussetzt: zeigt es nach dem Trocknen einen weißen Beschlag, so ist es nicht geeignet.« *Die Umschau 7, S. 134*

NESTBAU, SEX UND SAUGMUND

»Das Meerneunauge bewohnt die Meere Europas und Nordamerikas. Von ihrem Laichgeschäft weiß man nur so viel, daß die Meerbricke in Flüssen emporsteigt und Nester baut. Die Art [des Nestbaus] ist höchst interessant. Zunächst werden Steine gesucht und mit dem Saugmund zu einer kreisrunden Fläche zusammengetragen. Daran nimmt sowohl das Männchen als auch das Weibchen teil. Manchmal gesellt sich ein anderes Weibchen hinzu. Die Arbeit wird durch die Paarung unterbrochen, wobei das Männchen keinen Unterschied zwischen den Weibchen macht.« *Kosmos 2, S. 54*

1920

KEINE SUCHTGEFAHR DURCH MARIHUANA

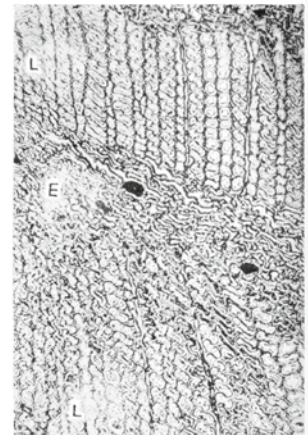
»Diese Feststellung trifft Lester Grinspoon in *Scientific American*, Dez. 1969. Wenn ein Konsument aufhört, die Droge zu gebrauchen, so entstehen keine Entzugssymptome; die Gewöhnung ist nicht so stark wie im Fall von Tabak oder Alkohol. Somit erscheint es fraglich, ob man bei Marihuana von Mißbrauch sprechen kann. Marihuana steigert auch nicht die Kriminalität und fördert nicht sexuelle Ausschweifungen. In gewissem Sinne scheint chronischer Alkoholmißbrauch gefährlicher zu sein als Marihuana.« *Die Umschau 4, S. 120*

KIFFEN MACHT DOCH ABHÄNGIG

»P. Kielholz und D. Ladewig berichten jetzt, daß bei chronischem Mißbrauch [von Marihuana] ängstlich-depressive Verstimmungszustände auftreten und daß sich schnell eine psychische Abhängigkeit entwickelt. Bei hohen Dosen lassen sich leichte Abstinenzsymptome nachweisen. Auch in der Schweiz hat sich – ähnlich wie in anderen europäischen Ländern – der Marihuanamißbrauch fast explosionsartig unter Mittelschülern, Studenten, Kunstgewerbeschülern und Lehrlingen ausgebreitet.« *Die Umschau 5, S. 152*

MILLIONEN JAHRE ALTES HOLZ NOCH FAST INTAKT

»Untersuchungen an Proben eines miozänen [zirka 5,3 bis 23 Millionen Jahre alten] Senckenberg-Ligniten ergaben, daß das Holzgewebe strukturell intaktes Lignin und Zellulose enthielt. Querschnitte zeigen ein gut erhaltenes axiales und horizontales Zellsystem im Spätholz. Die relativ dünnwandigen Zellen des Frühholzes hingegen sind erheblich zusammengedrückt. Das Braunkohleholz stammt



Querschnitt durch den Ligniten.

sehr wahrscheinlich von einer *Taxodium*-Art oder einer eng verwandten Gattung. Die Zellulose ist in dem Ligniten als Polysaccharid vorhanden. Die Mineralisierung des Holzes während eines frühen Stadiums der Ablagerung dürfte den Abbau der organischen Zellwandsubstanzen verlangsamt oder verhindert haben.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 2, S. 66*

Unsere Sonderhefte!



Festkörper: Topologische Materialien
 • Materialwissenschaft: Zweidimensionale Revolution
 • Bildgebung: Zeitenwende in der Mikroskopie
 • Teilchenphysik: Extreme Atome
 • Biomimetik: Die Natur als Vorbild • € 8,90



Kommunikation: Der Ursprung der Sprache
 • Steinzeit: Wie sich *Homo sapiens* durchsetzte
 • Aggression: Die Erfindung des Krieges
 • Genetik: Per DNA-Verlust zum Menschen
 • Bewusstsein: Das schwierigste Problem • € 8,90



Essay: Was Helden ausmacht
 • Märtyrer: Sterben für den Glauben
 • Mittelalter: Der Mythos vom edlen Ritter
 • David: Wie aus Künstlern Heroen werden
 • Napoleon I.: Meisterliche Imagepflege • € 8,90



Universelle Gesetze: Zentraler Grenzwertsatz und Zufallsmatrizen
 • Superlative: Sportliche Höchstleistungen und Hitzewellen
 • Fehlschlüsse: Missbrauch des p-Werts und mangelnde Reproduzierbarkeit • € 8,90



Per Tollwut in die Denkkzentrale
 • Hirnkarte: Jobverteilung im Gehirn
 • Ein Strichcode für Neurone
 • Konnektomforschung: Die Entschlüsselung des Geistes
 • Neuroimaging: Monster-Scanner in Aktion
 • Was Hirnscans aussagen • € 8,90



Hirnstimulation: Hightech für Selbstoptimierer
 • Mentales Training: Drei Wege zum Nirwana
 • Selbstdisziplin: Wo ein Wille ist ...
 • Futter fürs Gehirn
 • Was Sport im Gehirn bewegt
 • Kreativ denken – die sieben besten Strategien • € 8,90

Bestellmöglichkeit für diese und weitere Sonderhefte:

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

Alle Sonderhefte auch im PDF-Format

FEINSTAUB DER WOLKENSTAUBSAUGER VON SPITZBERGEN

Warum weichen selbst die besten Klimamodelle immer noch voneinander ab? Die Antwort hofft ein Forscher in der Arktis zu finden: Dort untersucht er Wolken und Feinstaub aus der saubersten Luft der Welt.



Tamara Worzewski ist promovierte Geophysikerin und Wissenschaftsjournalistin. Die Reise nach Ny-Ålesund auf Spitzbergen wurde ihr durch ein Stipendium von der Robert-Bosch-Stiftung und n-ost im Rahmen des Cross-Border-Journalisten-Programms »Reporters in the Field« ermöglicht.

» spektrum.de/artikel/1693100

Wenn Paul Ziegers Familie von ihm wissen will, warum er in der Arktis Wolken nachjagt, antwortet er: um Klimavorhersagen zu verbessern. Für seine Fachkollegen sind die Ergebnisse des Professors für Atmosphärenphysik von der Universität Stockholm eine kleine Sensation: »Wir haben gemessen, dass Nanopartikel doch zur Wolkenbildung in der Arktis beitragen, und suchen jetzt ihre Quellen.« Das schien erst einmal nicht zu einer bedeutenden Theorie der Wolkenbildung zu passen – und könnte bei der Erklärung helfen, warum die Arktis plötzlich so warm wird.

Lange meinten Fachleute, um Nanopartikel könnten sich keine Wassertröpfchen formen, da dazu nach der so genannten Köhler-Theorie eine extrem hohe und damit unwahrscheinliche Übersättigung der Luft mit Wasserdampf erforderlich ist. Deshalb staunte die internationale Exper-

tengemeinschaft Ende 2018 nicht schlecht, als Ziegers Team nach einer zweijährigen Messung in der Arktis zeigte, dass sogar winzige Partikel von nur 15 bis 20 Nanometer Größe einen wichtigen und regelmäßigen Beitrag zur Wolkenbildung liefern.

Jetzt berichten die Fachleute von weiteren überraschenden Beobachtungen: Diese kleinen Partikel spielen vor allem im arktischen Winter eine große Rolle bei der Entstehung von Wolken. »Das ist besonders interessant, weil man weiß, dass die stärkste Erwärmung in der Arktis im Winter stattfindet«, bemerkt Zieger.

Laut Weltklimarat tragen die komplexen Prozesse um Wolken und Aerosole (siehe »Kurz erklärt«, S. 66) zu den größten Unsicherheiten im Strahlungshaushalt von Klimaprojektionen bei. Deswegen fährt Zieger seit fünf Jahren regelmäßig auf fast 79 Grad nördlicher Breite zum Zeppelin-Berg bei der nördlichsten Siedlung der Welt, dem internationalen Forscherdorf Ny-Ålesund auf Spitzbergen.

Täuschend nah scheinen die 14 Kilometer entfernten Gletscher auf der anderen Seite des Fjords. Dank der extrem sauberen Luft im hohen Norden kann man vom Zeppelin-Berg bei Ny-Ålesund auf Spitzbergen ungewohnt weit blicken. Aber auch hier gibt es Feinstaub in der Luft, der die Wolkenbildung beeinflusst.

TAMARA WORZEWSKI

Auf dem Berg thront das Zeppelin-Observatorium, von dessen Terrassen aus die kalbenden Gletscher auf der anderen Fjordseite nur eine Spazierfahrt entfernt scheinen. Doch weit gefehlt: Im Jahr 2018 machten zwei deutsche Forscher einen sonnigen Kanuausflug zum nächstgelegenen Gletscher – um auf halbem Weg wieder umzukehren. Wer zum ersten Mal in die Arktis kommt, verschätzt sich wegen der extrem sauberen Luft: Hier ist die Trübung durch Feinstaub und Wasser so gering, dass die Sicht ungewohnt weit reicht. »Sie hätten vorher die Karte studieren sollen«, bemerkt Helge Markussen schmunzelnd, der die norwegische Polarstation in Ny-Ålesund samt Zeppelin-Observatorium leitet. »Dann hätten die Freizeitpaddler wohl festgestellt, dass dieser Gletscher nicht nur ein paar, sondern ganze 14 Kilometer entfernt ist.«

Hotspot für Forschungsgruppen weltweit

Etliche Nationen betreiben eine beeindruckende Auswahl verschiedener spezialisierter Messinstrumente auf der Zeppelin-Station. So untersuchen Norweger meteorologische Parameter, Gase und Schadstoffe in der Luft, Schweizer messen die Rußkonzentrationen, Japaner die Größenverteilung der Wolkentröpfchen, wieder andere Gruppen interessieren sich für die Strahlung. Alle zusammen erfüllen sie eine Art Wächterfunktion: Denn von hier aus schlugen Wissenschaftler 2015 Alarm, als die globale CO₂-Durchschnittskonzentration in der Atmosphäre die Grenze von 400 ppm (Millionstel Teile) überschritt. Ein Jahr zuvor stellten sie fest, dass schädliche Substanzen von Pflegeprodukten ihren Weg nach Spitzbergen gefunden hatten, und Jahre vorher meldeten sie bereits gefährlich hohe Quecksilberkonzentrationen in der arktischen Atmosphäre, die auch auf die europäische Kohleindustrie zurückgingen.

Warum sich die nördlichen Polargebiete doppelt so schnell erwärmen wie die Erde insgesamt, ist immer noch rätselhaft. Das gilt vor allem für den arktischen Winter, der besonders rasch milder wird und sich dadurch gebietsweise um Wochen verkürzt. Zu einem guten Teil lassen sich die höheren Temperaturen auf veränderte Luftströmungen zurückführen, die mehr Tiefdruckgebiete in den hohen Norden bringen – und mit ihnen warme Luft.

Ein weiterer Teil hängt mit Rückkopplungseffekten zusammen: Wo beispielsweise die isolierende Meereisdecke schmilzt, kann der Ozean seine Wärme direkt an die Luft abgeben. Im Winter sind auch eintreffende Meeres-



TAMARA WORBIEWSKI

Ein ausgeklügeltes Trennverfahren mit zwei entgegengesetzten Luftströmungen trennt »aktivierte« Staubteilchen, an denen Wasser zu Wolkentröpfchen kondensiert, von inaktiven Partikeln, die nicht zur Wolkenbildung beitragen.

strömungen sowie die gesamte Luftsäule bis in acht Kilometer Höhe wärmer. Doch gänzlich geklärt ist die rasante arktische Aufheizung, die mit dem Klima des gesamten Planeten auf komplexe Weise verbunden ist, noch nicht.

Das erschwert es Klimamodellierern, die Zusammenhänge in eine für Computer verdauliche Form zu bringen. Unsicherheiten in diesen mathematischen Vereinfachungen pflanzen sich fort und führen letztlich zu den unterschiedlichen Klimaprojektionen. Der Weltklimarat IPCC zeigt in seinem Report mit der generellen Erwärmung durchaus den Konsens sämtlicher Modelle. Die projizierten Endtemperaturen für 2100 klaffen aber für jedes berechnete CO₂-Emissionsszenario um einige Grad auseinander.

Nanometergroße Partikel als Wolkenbildner würden derzeit gar nicht in Klimamodellen berücksichtigt, betont



TAMARA WORBIEWSKI

AUF EINEN BLICK STOCHERN IM NEBEL

- 1** Weil die Prozesse der Wolkenbildung noch nicht im Detail verstanden sind, tragen sie zu den größten Unsicherheiten in Klimamodellen bei.
- 2** Wissenschaftler wollen den Mechanismen auf die Spur kommen, indem sie auf Spitzbergen die kleinsten Bestandteile von Wolken untersuchen.
- 3** Schon jetzt überraschen die Messungen die Fachgemeinschaft mit der Erkenntnis, dass viel kleinere Teilchen als bislang gedacht die Entstehung von Wolken initiieren.

Zieger. Ihr Einfluss könnte allerdings erheblich sein. Arktische Wolken spielen vermutlich eine Schlüsselrolle bei der raschen arktischen Erwärmung, denn sie regulieren den Strahlungshaushalt: Manche von ihnen reflektieren die Sonnenenergie in den Weltraum zurück und kühlen somit die Atmosphäre. Im arktischen Winter dagegen, wenn die Sonne kaum oder überhaupt nicht scheint, wirkt praktisch jede Wolke wie eine Wärmedecke.

Dank der üblicherweise geringen Konzentration an Aerosolen ist die Arktis der ideale Ort, um die Wolkenbildung unverfälscht zu studieren. Im Großraum Frankfurt misst der Deutsche Wetterdienst bei sehr trockener Luft bestenfalls eine atmosphärische Sichtweite von 75 Kilometern – das ist die Messgrenze des Geräts. Auf der Zeppelin-Station hingegen bestimmt ein Laser eine maximale theoretische Sichtweite von mehr als 200 Kilometern.

Aerosole und Wolken können die Atmosphäre sowohl kühlen als auch wärmen

Den Unterschied macht der Feinstaub: Aerosole sind nano- bis mikrometergroße, in der Luft schwebende Partikel aus anorganischen und organischen Stoffen wie Ruß, Sulfaten, Meersalz, Pollen, Bakterien oder Schwefelsäure. Gemäß der Köhler-Theorie entstehen Wolkentropfchen um ein solches Aerosolpartikel herum; es dient als Kondensationskeim. Zieger erläutert: »Sobald wir Menschen zusätzliche Partikel in die Atmosphäre bringen, ändern wir den Strahlungstransport und, da jedes Wolkentropfchen ein Aerosolpartikel braucht, auch die Wolkenbildung.«

Wie sich Wolken bilden und ob sie das Klima erwärmen oder abkühlen, hängt von der Höhe und der Wassersättigung sowie vom Gehalt und der Verteilung der Aerosole ab – und davon, woraus die Aerosole bestehen und wie sie mit den Wolken wechselwirken. Denn die Teilchen selbst beeinflussen das Klima ebenfalls: Schwarze Rußpartikel nehmen beispielsweise Sonnenenergie auf und erwärmen dadurch die Atmosphäre. Die meisten Partikel, darunter Meersalz und Sulfate, seien jedoch weiß, reflektierten das Sonnenlicht und wirkten daher abkühlend auf die Atmo-

sphäre, sagt Zieger. »Andererseits«, betont er, »braucht nicht nur jedes Wolkentropfchen, sondern auch jedes Eiskriställchen ein Aerosolpartikel, um zu entstehen.«

In der Arktis wird die Wolkenbildung daher noch komplexer. Hier gibt es drei Arten von Wolken: Wolken aus Wassertropfchen, Eiswolken aus Eiskristallen sowie Mischphasenwolken, die aus Eiskristallen und Wassertropfen bestehen. »Bei Eisbildung ist es allerdings etwas komplizierter, denn hier kommen zusätzliche, oft ungenügend verstandene Prozesse hinzu«, erklärt Zieger, »so genannte sekundäre Eisprozesse.«

Um arktische Wolken besser zu verstehen, dringt Ziegers Team wörtlich bis zu ihrem Kern vor und misst Aerosole, Wolkentropfchen und Eiskristalle im Einzelnen: »Wir trocknen die Tropfchen und gucken dann nur den Nukleus an, der zur Wolkenbildung geführt hat. Also den Wolkentropfenkern – und zwar fast gänzlich ohne Wasser.« Die getrockneten Kerne werden hinsichtlich Größe und chemischer Eigenschaften analysiert.

Überhaupt bedeuten die Nanopartikel eine Herausforderung, denn ihre Masse ist so gering, dass sie sich nicht mit konventionellen Methoden untersuchen lassen. Dafür sind verschiedene Aufrüstungen der Messeinrichtung notwendig, die im Lauf des Jahres 2020 erfolgen sollen.

Eine davon ist bereits im Gange: Ziegers Doktorand Gabriel Freitas will Fluoreszenz und Form der Wolkenkerne unter die Lupe nehmen. Wenn sie nach einer speziellen Bestrahlung leuchten und eine bestimmte Gestalt aufweisen, sind sie höchstwahrscheinlich biologischen Ursprungs. Das Material stamme dann aus dem Ozean, von Pflanzen – zum Beispiel von Pollen – oder Bakterien. Freitas nutzt hierfür eine Art Bioaerosoldetektor, der ursprünglich für militärische Zwecke entwickelt wurde, um biologische Kampfstoffe zu registrieren, und funktioniert ihn für die Wolkenforschung um. »Wir wollen Wolken besser beschreiben, indem wir die Quellen besser verstehen«, erklärt Zieger. »Wir wissen gar nicht so genau, wo die ganz kleinen Partikel in der Arktis herkommen – es ist alles möglich.« Die Kondensationskerne könnten natürlichen, aber auch menschlichen Ursprungs sein. Denn die Arktis wird regelmäßig von »arctic haze« (arktischer Dunst) heimgesucht, einem Phänomen, das verstärkt ver-

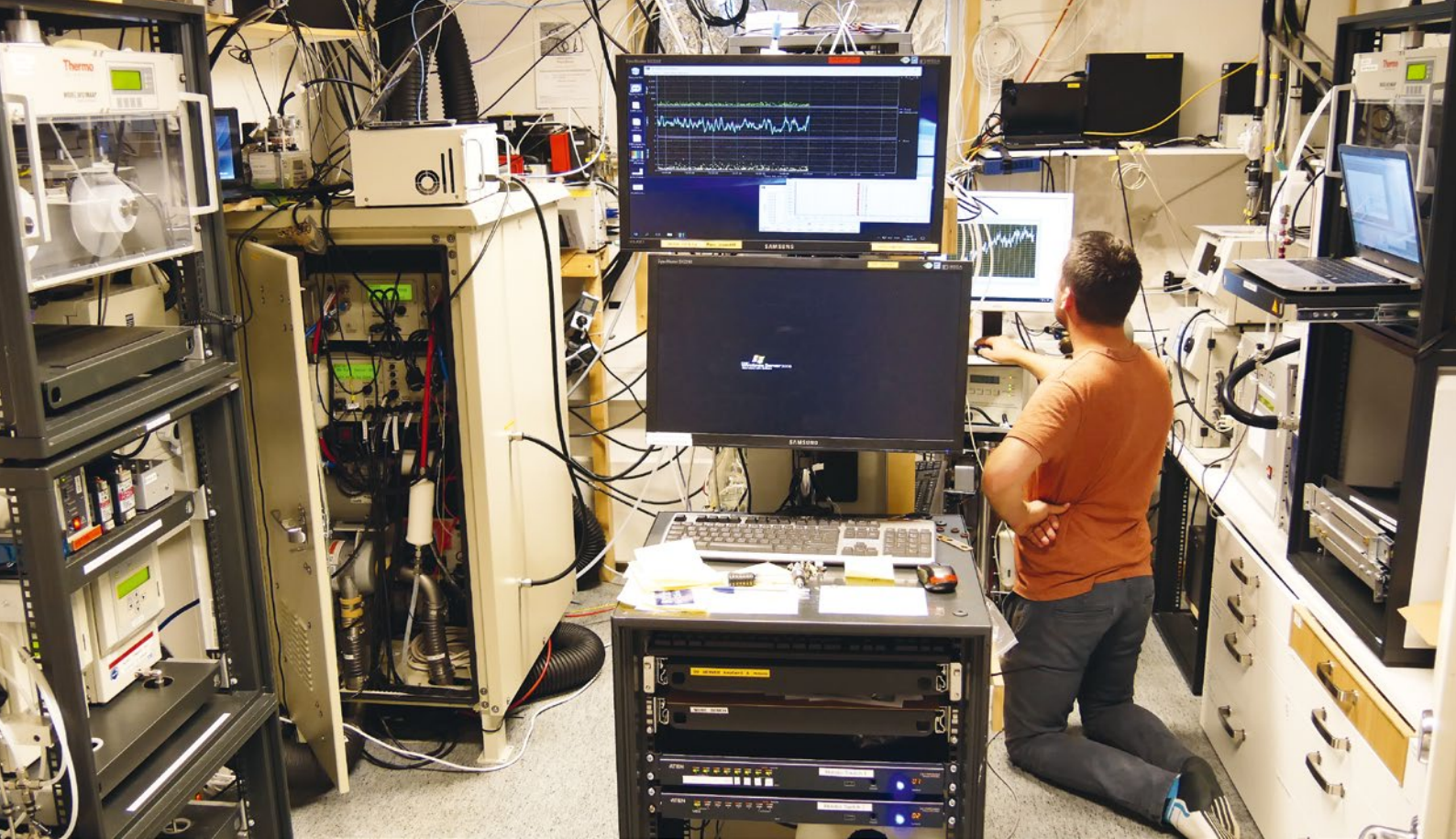
Kurz erklärt

Aerosole

Nano- bis mikrometergroße, in der Luft schwebende Partikel aus anorganischen und organischen Stoffen, beispielsweise Ruß, Sulfaten, Meersalz, Pollen, Bakterien oder Schwefelsäure

Arktische Verstärkung

Im Zuge des Klimawandels erwärmen sich die nördlichen Polarregionen etwa doppelt so schnell wie die anderen Gebiete auf der Erde. Warum, ist nur teilweise geklärt.



Im Labor auf dem Zeppelin-Berg kalibriert ein Forscher gerade ein Messgerät, das Rußteilchen in der Luft erfasst. Die vielen Instrumente heizen den Raum so stark auf, dass er gekühlt werden muss – obwohl vor der Tür fast das ganze Jahr über Schnee liegt.

schmutzte Luft aus Asien und Europa gen Norden transportiert. Dieser jährliche Zyklus beeinflusst die Wolkenbildung zwar ebenfalls, allerdings liegt sein Höhepunkt nicht im Winter, sondern im Frühling.

Gerade montieren der Professor und sein Doktorand das Fluoreszenzmessgerät an ihr liebevoll Wolkenstaubsauger genanntes Messinstrument. Die raketenförmige, offiziell als Wolkeneinlass bezeichnete Apparatur bildet das Herzstück der neuen Einrichtung zur detaillierten Analyse der Wolkenkerne. Sie ist eine von wenigen weltweit – und die einzige in der Arktis.

Aber sie ist hier nur eine von einer Vielzahl unterschiedlicher Apparaturen, mit denen Forschungsgruppen aus aller Welt die Atmosphäre observieren. Es erscheint paradox angesichts der bitteren Kälte draußen: Doch es stehen so viele Wärme produzierende Instrumente in den Räumlichkeiten, dass eine Klimaanlage das arktische Observatorium auf angenehme 20 Grad herunterkühlen muss. Zudem sind zahlreiche Fenster mit Aluminiumfolie abgedunkelt, damit im Sommer die 24 Stunden lang scheinende Sonne die Labore nicht noch zusätzlich erwärmt.

Der Stationsleiter Helge Markussen und sein Team aus Ingenieuren und Technikern warten täglich die Instrumente der internationalen Arbeitsgruppen, wechseln Filter, füllen Lösungen nach, machen Wetterbeobachtungen und führen etwaige Reparaturen durch. Nach draußen auf die Terrasse

geht er nur, wenn es unbedingt notwendig ist, und notiert im Logbuch anschließend seine genaue Aufenthaltsdauer. Denn manche Schadstoffmessgeräte sind hochempfindlich und spüren menschliche Ausdünstungen. So darf man die Terrasse auch nicht mit bestimmten Kleidungsstücken und Parfüms betreten – das könnte Messpunkte verfälschen.

Mit lautem Getöse wird die Wolke eingesaugt

Jetzt jedoch steht der Stationsleiter draußen bei eisigem Wind, da eine Wolke das Observatorium passiert: ein perfekter Zeitpunkt für Zieger, um die Funktionsweise des Wolkenstaubsaugers zu demonstrieren, den Markussens Team in Zukunft auch betreuen soll. Ähnlich, wie ein Rauchmelder Alarm schlägt, startet der Sichtweitenmesser den Wolkenstaubsauger, sobald der Wert unter einen Kilometer fällt und damit eine Wolke ankündigt.

Dann öffnet sich der Raketenkopf und saugt mit einer Pumpe laut tosend das Gemisch aus Luft, Wolkentröpfchen, Eiskristallen und Aerosolen ein. Zieger hält seine Hand demonstrativ in den Sog, während er dem Stationsleiter das Funktionsprinzip erklärt: Die Wolke wird durch das Vakuum im Inneren des Geräts mit einer Geschwindigkeit von etwa 100 Metern pro Sekunde auf einen spitzen Probeneinlass gelenkt. »In dieser Spitze herrscht ein kleiner Gegenstrom. So selektieren wir nur die Wolkentröpfchen und Eiskristalle.« Die nämlich sind groß und schwer genug, um einfach weiterzufliegen. Die nicht aktivierten Partikel, also jene, die kein Wasser anlagern und deswegen auch nicht als Keime für Tropfen oder Kristalle dienen, lenkt der Gegenstrom um; sie werden separat gesammelt. So können die Wissenschaftler Tröpfchen und Kristalle getrennt von den Partikeln untersuchen, die nicht zur Wolkenbildung beigetragen haben.

Diese Differenzierung zwischen aktivierten und nicht aktivierten Staubteilchen, und zwar in der Wolke selbst, ist die entscheidende Neuerung bei Ziegers Verfahren. Andere Messmethoden bestimmen die Wolkenkernkonzentration in einem Quäntchen Luft, indem alle Aerosole gesammelt, getrocknet und anschließend verschiedenen festgelegten Übersättigungsdrücken ausgesetzt werden. So führt man eine künstliche Aktivierung zu Wolkenkernen herbei, die dann erst gemessen wird. Die Messeinrichtung des Stockholmer Forschers hingegen studiert die Originalkerne und unterscheidet, welche Partikel natürlich aktiviert wurden und welche nicht.

Die eingesaugte Luft wird in die Innenräume des Observatoriums geleitet und dort automatisch analysiert. Ein Computersystem erfasst die Ergebnisse und stellt sie in Echtzeit ins interne Netz, so dass die Forscher später jede Änderung live aus ihren Universitätsbüros mitverfolgen können. Noch sind sie aber unter dem frostgrauen Himmel und müssen sich sputen, ihre Apparaturen zu installieren und zu kalibrieren, denn in wenigen Tagen fliegen sie zurück nach Schweden.

Globaler Datenabgleich

Stationsleiter Markussen hat sich derweil verabschiedet und fährt mit der Gondel hinunter, um auf der Bodenstation seiner täglichen Routine nachzugehen. Freitas versucht mit vom Wind steif gefrorenen Fingern, einen Feuchtigkeitsmesser an das Geländer zu schrauben. Währenddessen kalibriert Zieger drinnen mit Schallschutzkopfhörern das Ultraschall-Anemometer, das 100-mal pro Sekunde Richtung und Geschwindigkeit des arktischen Winds aufzeichnet – schließlich will man auch wissen, woher die eingesaugte Wolke kommt und wie schnell. Die Daten lassen sich später mit großflächigen Wolkenradarmessungen vergleichen. Und noch besser: Mit direkten Echtzeitmessungen aus dem Zeppelin-Observatorium überprüft man Daten aus Fernerkundungsmethoden, die reale Werte ja nur indirekt bestimmen können.

Plötzlich fällt der Strom aus. Die Labore liegen im Dunkeln, die Notstromaggregate springen piepend an und versorgen noch etwa eine halbe Stunde lang die diversen blinkenden Apparate. Dann wird es still in der Station, und Zieger nimmt seinen Kopfhörer ab.

Die Zwangspause spendet einige Momente Ruhe. Denn die Forscher sind stets von früh bis spät am Schrauben, Programmieren, Kalibrieren – mit Ausnahme der Mittagspause, für die sie mit der Gondel ins Tal zum Essen mit allen anderen Wissenschaftlern in Ny-Ålesund fahren. Zieger hat sich hier angewöhnt, mittags nichts zu trinken, da es auf dem Observatorium keine Toilette gibt und es bei den sensiblen Instrumenten streng verboten ist, sich draußen zu erleichtern.

Der Stromausfall überrascht ihn. Das sei ungewöhnlich, weil Ny-Ålesund seinen eigenen Generator sowie einen Notfallgenerator betreibt. Er ist aber nicht beunruhigt. Schließlich sei ein Stromausfall nur im Winter bedenklich, wenn die elektrischen Heizungen ausfallen und die tiefen Minustemperaturen lebensgefährlich werden können – dafür gäbe es dann Evakuierungspläne. Er verschafft sich

einen Überblick und stellt zufrieden fest: »Es gibt hier eine Notfalltoilette via Tüte, zwei Schlafsäcke und eine Dose Kichererbsen, falls wir hier übernachten müssen.« Denn ohne Strom fährt die Gondel nicht ins Tal.

Nach einigen Stunden ist das Problem zum Glück behoben. Markussen ruft die Forscher auf dem Berg an und lässt sie die Geräte überprüfen – wo sie schon mal da sind. Fast alle internationalen Geräte starten automatisch wieder und setzen ihre Messreihen unbehelligt fort, genauso der Wolkenstaubsauger.

Dieser soll 2020 das ganze Jahr über im Zeppelin-Observatorium messen und mit weiteren Analysetechniken ausgestattet werden. Die Forscher kooperieren darüber hinaus mit MOSAiC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate), der bisher größten Arktisexpedition, bei der sich die Wissenschaftler auf dem Forschungseisbrecher Polarstern eingefroren ins Meereis ein Jahr lang durch die Arktis treiben lassen, um das dortige Klimasystem zu verstehen (siehe »Spektrum« Oktober 2019, S. 56). »Während des MOSAiC-Jahrs werden wir hier auf Zeppelin unsere Messungen intensivieren, um mit den Daten zur wissenschaftlichen Auswertung beitragen zu können«, sagt Zieger und fügt stolz hinzu: »Unsere Daten werden für die MOSAiC-Auswertungen eine wichtige Referenz sein.«

Im November 2019 ist Zieger wieder zum Zeppelin-Observatorium gefahren, um mit seinen Kollegen ein Massenspektrometer zu installieren, das die chemischen Bestandteile der Wolkenkeime vor Ort identifizieren kann. Seit im Frühjahr 2019 andere Atmosphärenforscher in den Pyrenäen weit außerhalb einer Stadt Mikroplastik in der Luft gefunden haben, steht die Frage im Raum, ob es solche Kunststoffteilchen sogar in die Arktis schaffen könnten. Zur Wolkenbildung werden diese Partikel wahrscheinlich nicht nennenswert beitragen. Aber falls doch, dann werden es die Forscher auf dem Zeppelin-Berg als Erste erfahren. ◀

QUELLEN

Dahlke, S. und Maturilli, M.: Contribution of atmospheric advection to the amplified winter warming in the Arctic North Atlantic region. *Advances in Meteorology* 2017, 2017

Karlsson, L. et al.: The annual cycle of Arctic cloud residual size (in review).

Nizzetto, P.B. et al.: Monitoring of environmental contaminants in air and precipitation, annual report 2014. Norwegian Environment Agency, M-368, 2015

WEBLINKS

<https://tinyurl.com/mosj-diagramme>

Aktuelle Treibhausgaskonzentrationen auf Spitzbergen in Diagrammen

www.ipcc.ch/report/ar5/wg1

Der 5. Bericht des Weltklimarats (IPCC) mit zahlreichen Grafiken

<https://tinyurl.com/svalbard2100>

Ein umfassender Überblick über die arktische Situation mit wissenschaftlichen Publikationen der letzten Jahre

VIDEOTIPP

www.spektrum.de/news/1681024

Die Autorin begleitet Paul Zieger mit der Kamera auf der Station.

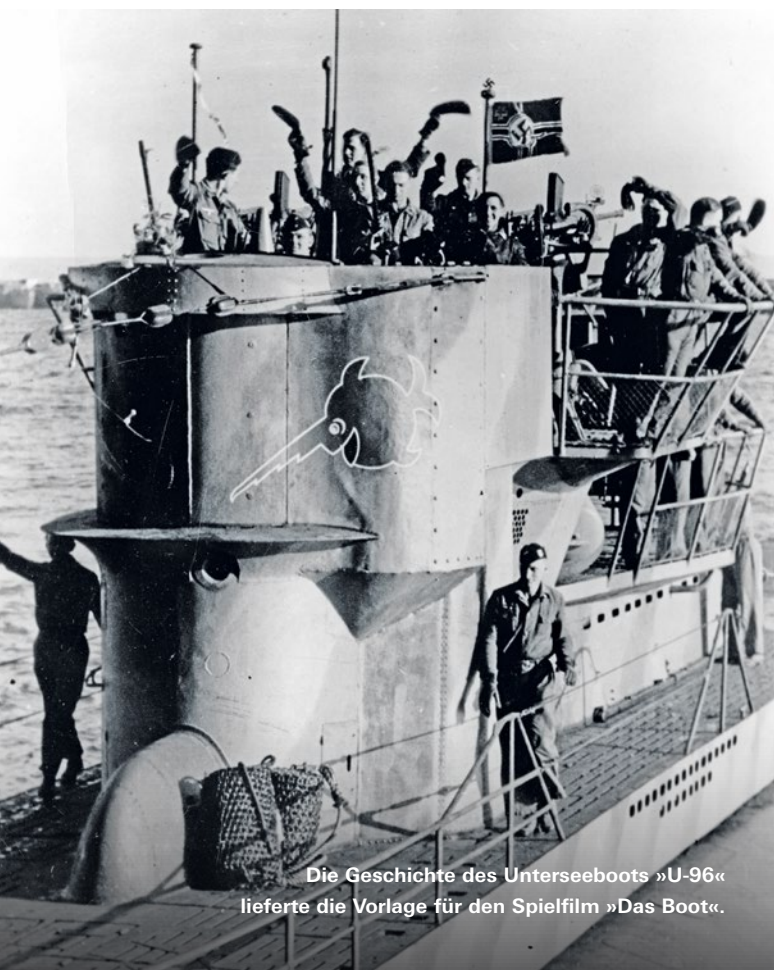
CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN ATEMNOT AUF ZELLULOID

Wie genau nehmen es Filmregisseure mit naturwissenschaftlichen Zusammenhängen? Hier werfen wir einen Blick auf die Chemie hinter den Blockbustern »Das Boot« und »Apollo 13«.



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

» spektrum.de/artikel/1693102



Die Geschichte des Unterseeboots »U-96« lieferte die Vorlage für den Spielfilm »Das Boot«.

PICTURE ALLIANCE / SAMMLUNG BERLINER VERLAG ARCHIV

► In Spielfilmen finden sich häufig naturwissenschaftliche Fragestellungen, die kritisch hinterfragt und experimentell nachgestellt werden können. Anhand der Streifen »Das Boot« und »Apollo 13« lässt sich zum Beispiel nachvollziehen, wie Alkalimetallverbindungen der Luft Kohlenstoffdioxid (CO_2) entziehen und dadurch Leben retten.

Die »U-96« ist eines der berühmtesten Unterseeboote des Zweiten Weltkriegs. Lothar-Günther Buchheim begleitete das Gefährt als Kriegsberichterstatter auf einer Patrouille und veröffentlichte seine Erinnerungen an die Ereignisse dieser Fahrt anschließend in dem Bestseller-Roman »Das Boot«, der später unter dem gleichen Namen verfilmt wurde.

Am 16. September 1939 wurde die »U-96« in Kiel zu Wasser gelassen und ein Jahr später unter dem ersten Kommandanten Heinrich Lehmann-Willenbrock in Einsatz gestellt. Die Besatzung bestand aus 48 bis 52 Mann. Am 30. März 1945 wurde die »U-96« in Wilhelmshaven bei einem Bombenangriff der Alliierten versenkt.

Im Film »Das Boot« ist eine Szene zu sehen, bei der ein Fliegerangriff das U-Boot bei der Durchquerung der Straße von Gibraltar schwer beschädigt. Nahezu manövrierunfähig, sinkt das U-Boot daraufhin auf den in 280 Meter Tiefe liegenden Meeresgrund.

Eine weitere Filmszene zeigt eine Lagebesprechung, in der der Leitende Ingenieur und der Kapitänleutnant mit Hilfe eines Konstruktionsplans des Boots diskutieren, ob es möglich ist, wiederaufzutauchen:

Leitender Ingenieur (LI): »Wir haben nur einen Versuch!«

Kapitänleutnant (KaLeu): »Wann?«

LI: »Wenn alle Reparaturen gemacht sind. In sechs bis acht Stunden.«



Wie Kohlenstoffdioxid (CO₂) mit Kaliumhydroxid (KOH) reagiert, kann man anhand dieses Versuchsaufbaus nachvollziehen. Im Quarzrohr (Mitte) befindet sich KOH, durch den linken Kolbenprober wird CO₂ darübergelitet. Daraufhin bildet sich im Quarzrohr Wasser, der rechte Kolbenprober bleibt leer. Es tritt also kein Gas aus, was zeigt, dass das gesamte CO₂ gebunden wurde.

KaLeu: »CO₂-Gehalt?«

LI: »1,8 Prozent.«

KaLeu: »Reicht der Sauerstoff?«

LI: »Nein.«

KaLeu: »Kalipatronen! Für alle, die nicht arbeiten. Die freien Leute in die Kojen.«

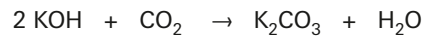
Hier wird die zentrale Problematik offenkundig, dass der Sauerstoffgehalt im Boot nicht ausreichen wird, während der Anteil an CO₂ stetig zunimmt. Gleichzeitig stellt sich die Frage, welche Funktion die Kalipatronen haben und was sie in dieser Situation bewirken sollen. Aus weiteren Filmszenen geht hervor, dass diese offensichtlich das CO₂ binden können, das Gas also aus der Umgebungsluft entfernen. Wie aber funktioniert diese CO₂-Fixierung, und wie sind die Tauchretter-Kalipatronen aufgebaut?

Ein solcher Tauchretter besteht aus zwei zentralen Bauteilen, einer Alkalipatrone und einer Sauerstoffflasche. Über einen Atemschlauch wird die ausgeatmete Luft in die Alkalipatrone (befüllt mit rund einem Kilogramm Kaliumhydroxid, KOH) geleitet. Gleichzeitig gelangt durch diese lebenswichtiger Sauerstoff aus der Vorratsflasche in die Lunge.

Mit einem Experiment lässt sich die chemische Funktion des Kaliumhydroxids in den Tauchrettern untersuchen (die exakte Versuchsbeschreibung, eine genaue Auflistung der Geräte und Chemikalien sowie weitere Versuchsvarianten sind unter spektrum.de/artikel/1693102 zu finden). Zunächst gibt man dazu etwa ein Gramm Kaliumhydroxid in ein Quarzrohr, das zu beiden Seiten mit Glaswolle verschlossen wird. (Vorsicht, KOH ist ätzend – bei Hautkontakt mit viel Wasser nachspülen.) In einen von zwei Kolbenprobern füllt man 50 Milliliter Kohlenstoffdioxid und integriert ihn gemeinsam mit dem Quarzrohr in den Versuchsaufbau (siehe Bild oben). Anschließend wird das Kohlenstoffdioxid vorsichtig über das Kaliumhydroxid geleitet. Dabei erhöht sich die Temperatur am Quarzrohr deutlich (das Rohr vorsichtig kurz mit dem Finger berühren). Der zweite Kolbenprober bleibt leer; dies zeigt, dass kein Gas austritt, das Kohlenstoffdioxid also vollständig gebunden wurde. Im Quarzrohr ist außerdem die Bildung von Wasser zu beobachten.

Was ist passiert? Bei der stattfindenden chemischen Reaktion bindet Kaliumhydroxid das Kohlenstoffdioxid,

wobei Kaliumcarbonat (K₂CO₃) und Wasser entstehen. Gleichzeitig wird Wärme frei.



Kaliumhydroxid + Kohlenstoffdioxid → Kaliumcarbonat + Wasser

Da das Versuchsergebnis gezeigt hat, dass das Kaliumhydroxid das Kohlenstoffdioxid vollständig in Form von Kaliumcarbonat gebunden hat, stellt sich jetzt die Frage, wie sich der Einsatz der Tauchretter auf die Situation der U-Boot-Fahrer ausgewirkt hat. Oder konkret: Wie lange konnte die 50 Mann starke Besatzung der »U-96« ohne weitere Frischluftzufuhr überleben?

Bei einem CO₂-Gehalt in der Luft von fünf Prozent tritt bereits akute Atemnot und Ohnmacht ein, bei etwa acht Prozent der Tod. Ein erwachsener Mensch atmet pro Atemzug zirka 500 Milliliter Luft ein und setzt beim Ausatmen 20 Milliliter Kohlenstoffdioxid frei. Pro Minute produziert ein Seemann bei durchschnittlich 20 Atemzügen demnach rund 400 Milliliter CO₂.

Das Bodenkrollteam der NASA sucht nach einer Lösung, um das CO₂ aus der Apollo-13-Kapsel zu entfernen.

Die Bauanweisung zur Luftfilteranlage, bestehend unter anderem aus Lithiumhydroxid-Patronen, gibt das Team an die Astronauten durch.



Anhand dieser Daten kann man grob überschlagen, dass eine 50 Mann starke Besatzung in einer Stunde 1200 Liter CO₂ freisetzt; in 15 Stunden produziert die Mannschaft dann 18000 Liter und in 25 Stunden 30000 Liter des Gases. Bezogen auf ein Innenvolumen des U-Boots aus dieser Baureihe von etwa 350000 Litern beträgt der CO₂-Anteil der Luft im Boot nach 15 Stunden etwa 5,1 Prozent, es würde also bereits akute Atemnot herrschen. Nach 25 Stunden enthält die Luft im Boot 8,6 Prozent CO₂. Ohne weitere Luftzufuhr oder eine Reduktion des Kohlenstoffdioxidgehalts wäre die Besatzung dann demnach nicht mehr am Leben.

Unter Einsatz der Kalipatronen-Tauchretter mit insgesamt 50 Kilogramm Kaliumhydroxid ließen sich bezogen auf die zu Grunde liegende Reaktionsgleichung insgesamt 446 Mol CO₂ binden; dies entspricht einem Volumen von 10704 Litern (bei einem molaren Gasvolumen von 24 l/mol). Vergleicht man nun dieses maximal durch den Einsatz der Tauchretter gebundene CO₂-Volumen mit demjenigen, das die Besatzung in einer Stunde freisetzt, so zeigt sich, dass die Männer durch den Einsatz von Tauchrettern neun Stunden länger überleben können!

Eine ähnlich gelagerte kritische Situation sieht man im Spielfilm »Apollo 13«. Bei der 1970 durchgeführten gleichnamigen Mission explodierte während des Flugs ein Sauerstofftank, was ein Leck in den danebenliegenden zweiten Sauerstofftank riss. Damit konnten die Brennstoffzellen, die mit Gas aus den beiden Tanks gespeist wurden, die notwendige Strom- und Wasserversorgung nicht lange genug gewährleisten. Zudem stieg in der Raumkapsel schon nach kurzer Zeit die CO₂-Konzentration rapide an. Daher blieb nur die Möglichkeit, die Apollo-13-Mission abzubrechen und die Astronauten schnellstmöglich zurück zur Erde zu holen.

Eine Filmsequenz zeigt, dass der CO₂-Anteil in der Raumkapsel innerhalb kurzer Zeit stark zunimmt. Gleichzeitig arbeitet das Bodenkontrollteam der NASA fieberhaft an der Frage, wie sich das Gas aus der Kapsel entfernen lässt. Hierzu erhält die Besatzung vom Leiter des Kontrollteams am Boden die Arbeitsanweisung zum Bau einer Luft-Filteranlage, bei dem unter anderem zwei Kanister mit Lithiumhydroxid (LiOH) zum Einsatz kommen.

Mit der oben beschriebenen Vorgehensweise lässt sich auch die Funktion des Lithiumhydroxids experimentell untersuchen. Dazu werden 0,5 Gramm LiOH in ein Quarzrohr gefüllt, welches anschließend an beiden Seiten mit Glaswolle verschlossen wird. Nach Befüllen eines Kolbenprobers mit 50 Milliliter CO₂ baut man wieder die Versuchsanordnung aus dem Experiment mit KOH auf (ebenfalls entsprechend dem Bild links oben).

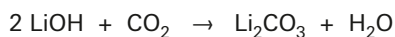
Nun wird das Kohlenstoffdioxid langsam über das Lithiumhydroxid geleitet, mit ähnlichem Resultat: Es lässt sich ein deutlicher Temperaturanstieg verzeichnen, das Kohlenstoffdioxid wird vollständig umgesetzt, und im Quarzrohr bildet sich Wasser.

Analog zu Kaliumhydroxid bindet Lithiumhydroxid in einer exothermen (Wärme freisetzenden) Reaktion das Kohlenstoffdioxid, wobei Lithiumcarbonat und Wasser entstehen:



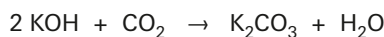
NASA, JSC IMAGES, NASA GOVERNMENTAL SP-356141

Noch einmal gut gegangen: die drei Astronauten der Apollo-13-Mission nach der Landung am 17. April 1970.

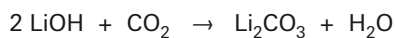


Lithiumhydroxid + Kohlenstoffdioxid → Lithiumcarbonat + Wasser

Hier stellt sich die Frage, warum in der Raumfahrttechnologie Lithiumhydroxid anstatt Kaliumhydroxid eingesetzt wurde. Dazu muss man die Molmassen in den Reaktionsgleichungen betrachten:



Molmasse KOH = 56 g/mol



Molmasse LiOH = 24 g/mol

Um die gleiche Menge an CO₂ zu absorbieren, benötigt man bei Verwendung von LiOH weniger als die Hälfte der eingesetzten Masse im Vergleich zu KOH – ein entscheidender Vorteil, da es in der Raumfahrttechnologie zentral ist, das Gewicht möglichst stark zu minimieren.

So spannend die Funktionsweise von Tauchrettern aus der chemischen Perspektive auch ist – wichtiger ist die Frage, ob die Besatzungen des U-Boots und der Apollo-13-Kapsel durch den Einsatz von Kalium- beziehungsweise Lithiumhydroxid überlebt haben.

Der Streifen »Das Boot« zeigt eindrucksvoll, dass die »U-96« dank der Tauchretter nach vielen Stunden tatsächlich wieder auftauchen und unbemerkt aus der Meerenge von Gibraltar nach La Rochelle entkommen konnte. Und auch im Spielfilm »Apollo 13« führte der Einsatz von Lithiumhydroxid zu einem glücklichen Ausgang für die Besatzung. Nach einem außergewöhnlich langen »Black-out« (Funkstille beim Wiedereintritt) wasserte die Apollo-13-Kapsel am 17. April 1970 im Pazifik, wo sie von der »USS Iwo Jima« aufgenommen wurde. ◀

ASTRONOMIE BLICK INS DUNKLE ZEITALTER

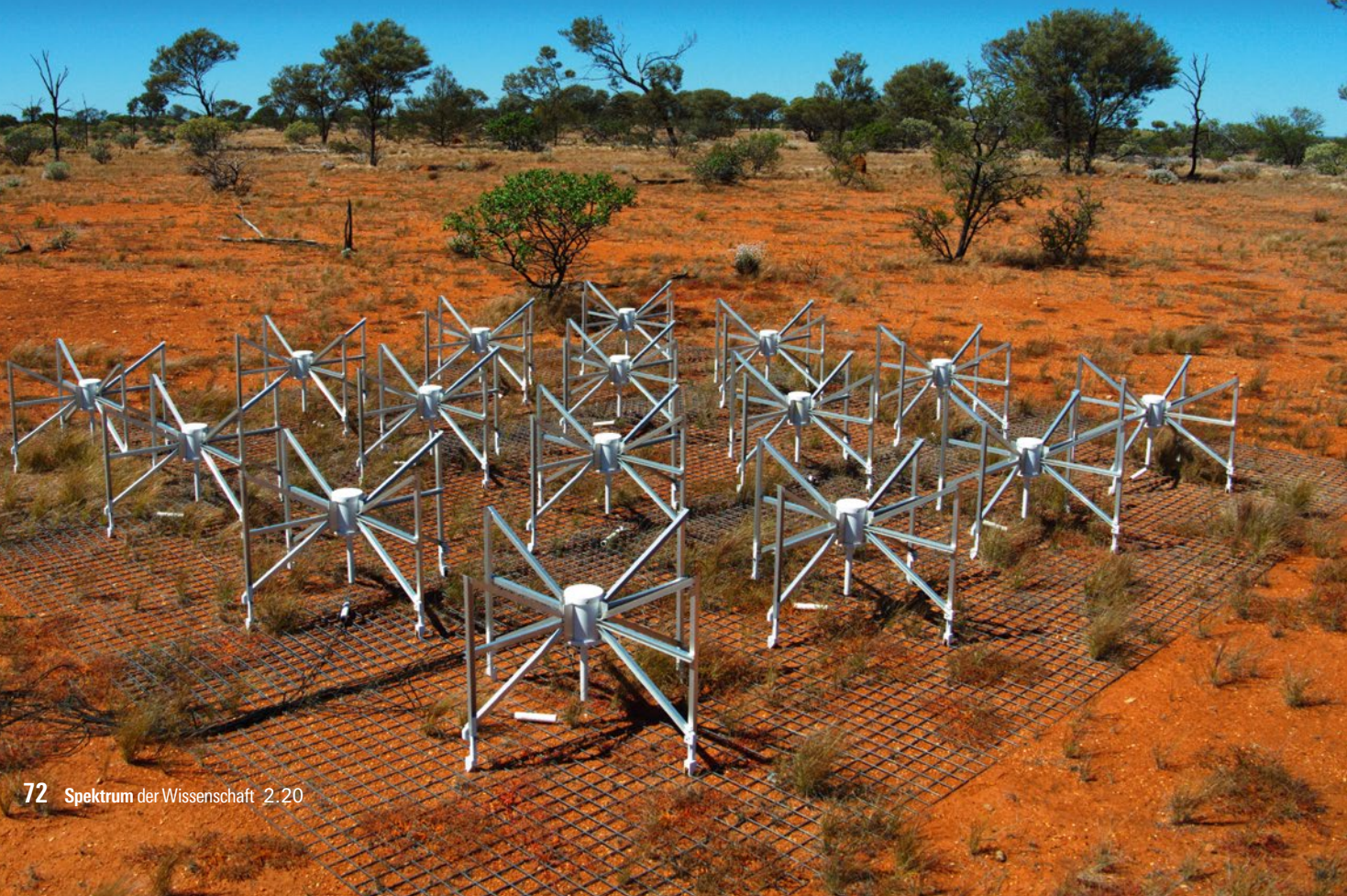
Lange schien die erste Jahrmilliarde des Universums hoffnungslos vor Teleskopen verborgen, denn die Strahlung aus jener Zeit wurde während ihrer Reise durch den Kosmos enorm geschwächt. Doch mit Hilfe moderner Technik spüren Radioastronomen nun den Signalen aus der Frühzeit des Kosmos nach.



Davide Castelvecchi ist Wissenschaftsjournalist in London.

» [spektrum.de/artikel/1693104](https://www.spektrum.de/artikel/1693104)

Das Radioteleskop des Murchison Wide-field Array besteht aus zahlreichen Kacheln mit einfachen Antennen, verteilt über eine große Fläche im australischen Outback.



Um eine vage Vorstellung von der Struktur des Universums aus irdischer Sicht zu bekommen, kann man an eine große Wassermelone denken. Unsere Milchstraße ist dann ein Kern in der Mitte. Das Weltall um uns herum – das Fruchtfleisch – enthält zahlreiche weitere Galaxien-»Kerne«, die wir von unserem zentralen Kern aus mit Teleskopen beobachten können. Licht breitet sich mit endlicher Geschwindigkeit aus. Darum erscheinen uns andere Galaxien so, wie sie in der Vergangenheit ausgesehen haben.

Die am weitesten vom Zentrum der Melone entfernten Kerne sind die jüngsten Objekte, die wir mit Hilfe von Teleskopen wahrnehmen können. Wir sehen sie zu einer Zeit, als das Universum etwa ein Dreißigstel seines heutigen Alters von 13,8 Milliarden Jahren hatte. Jenseits davon liegt die dünne grüne Schale der Wassermelone. Sie repräsentiert den gerade einmal 380 000 Jahre alten Kosmos. Er war erfüllt von einer warmen, leuchtenden Suppe subatomarer Teilchen. Wir wissen von dieser frühen kosmischen Epoche, weil wir ihr Licht detektieren können. Dessen Wellen wurden allerdings im Verlauf der langen Reise zu uns mitsamt dem übrigen Kosmos gestreckt. Es erreicht uns heute als schwaches Glimmen im Bereich der Mikrowellenstrahlung.

Zwischen der grünen Schale und dem roten Fruchtfleisch liegt ein besonders geheimnisvoller Abschnitt des beobachtbaren Universums: der weißliche Teil am inneren Rand der Wassermelone. Er entspricht der ersten Jahrmilliarde der kosmischen Geschichte. Astronomen hatten – mit Ausnahme einiger weniger, äußerst leuchtkräftiger Objekte – bislang kaum Einblick in diese Epoche.

Ein Babytagebuch des Universums

Ausgerechnet in dieser weitgehend unbekanntem Ära durchlief das Universum gewaltige und entscheidende Veränderungen. Der Kosmos, in dem wir uns heute befinden, ist offensichtlich deren Endergebnis. Aber zum Weg dorthin gibt es zahlreiche offene Fragen: Wie und wann bildeten sich die ersten Sterne, und wie sahen sie aus? Welche Rolle spielten Schwarze Löcher bei der Entwicklung der Galaxien? Und was können wir von diesem kritischen Zeitabschnitt über die Natur der rätselhaften Dunklen Materie und ihren Einfluss auf die Evolution des Kosmos lernen?

Mit einer ganzen Batterie von kleinen und großen radioastronomischen Projekten erkunden Wissenschaftler derzeit das kosmische Neuland. Dabei ist eine ganz spezielle Informationsquelle ausschlaggebend: Strahlung mit einer bestimmten Wellenlänge, die von atomarem Wasserstoff ausgesandt und absorbiert wird. Es ist das einfachste und mit Abstand häufigste Element der normalen Materie, die nach dem Urknall entstanden ist. Um das schwache Signal aufzuspüren, bauen Astronomen immer empfindlichere Observatorien an entlegenen Orten überall auf der Erde, beispielsweise auf einem Floß in einem See des tibetischen Hochlands und auf einer Insel in der kanadischen Arktis.

Einen ersten Hinweis auf ursprünglichen Wasserstoff in der Umgebung der frühesten Sterne könnte 2018 das Instrument EDGES gefunden haben (Experiment to Detect

the Global Epoch of Reionisation Signature, auf Deutsch: Experiment zum Nachweis charakteristischer Spuren der Epoche der Reionisierung). Es handelt sich um eine erstaunlich einfach aufgebaute Antenne im australischen Outback. Darüber hinaus geht eine ganze Reihe von weiteren Experimenten an den Start, die empfindlich genug sind, um die Verteilung des Wasserstoffs dreidimensional zu kartieren – und damit den sehr jungen Kosmos insgesamt. Der theoretische Astrophysiker Avi Loeb vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics im US-amerikanischen Cambridge nennt es das »letzte Grenzgebiet der Kosmologie«. Es enthalte den Schlüssel zu dem Geheimnis, wie sich aus einer recht gleichförmigen Masse von Teilchen Sterne, Galaxien und Planeten bilden konnten. »Das ist Teil unserer Entstehungsgeschichte, unserer Wurzeln«, betont Loeb.

Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall hatte sich das Universum so weit abgekühlt, dass sich Protonen und Elektronen zu Atomen verbunden haben – hauptsächlich zu Wasserstoff. Dessen Atome lassen sich mit Hilfe eines subtilen Mechanismus detektieren: Sein einziges Elektron kann dessen quantenmechanische Orientierung relativ zum Proton wechseln. Bei dem Vorgang sendet es entweder ein Lichtteilchen aus oder absorbiert eins. Die Energien der beiden Zustände liegen sehr dicht beieinander. Wegen dieser geringen Differenz hat das entsprechende Photon eine recht kleine Frequenz und eine große Wellenlänge von rund 21 Zentimetern.

Diese typische Signatur des Wasserstoffs offenbarte Astronomen in den 1950er Jahren die Spiralstruktur der Milchstraße. In den späten 1960er Jahren erkannte der sowjetische Kosmologe Rashid Sunyaev – seit 1995 am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching tätig – als einer der ersten Wissenschaftler die mögliche Bedeutung der 21-Zentimeter-Spektrallinie für die Erforschung des jungen Kosmos. Die damals entstandene Strahlung wurde seither mit der Expansion des Weltalls gestreckt. Darum hat sie heute, wenn sie die Erde erreicht, Wellenlängen im Bereich von 1,5 bis 20 Meter mit Frequenzen zwischen

AUF EINEN BLICK SIGNAL VOM JUNGEN ALL

- 1 Die Entwicklung des Kosmos und der frühesten Sterne schlägt sich in der Strahlung nieder, die Wasserstoffatome in den ersten hundert Millionen Jahren ausgesendet und absorbiert haben.
- 2 Das charakteristische Signal wurde im Lauf der Expansion des Alls auf Wellenlängen gedehnt, die jahrzehntelang unmessbar waren. Das ändert sich nun.
- 3 Mit Radioteleskopen an abgelegenen Orten wollen Astronomen die Strahlung registrieren. Sie hoffen, damit zu rekonstruieren, wie sich die ersten Galaxien und großräumigen Strukturen geformt haben.

15 und 200 Megahertz. Sunyaev und sein damaliger Mentor, der 1987 verstorbene Jakow Seldowitsch, überlegten, wie man mit der Strahlung Theorien zur Entstehung der Galaxien überprüfen könnte. »Doch als ich darüber mit Radioastronomen sprach, sagten sie mir: ›Rashid, du bist verrückt!««, erinnert sich der Forscher. »Sie meinten, wir würden niemals in der Lage sein, das zu beobachten.«

Das Problem: Die kosmische Expansion hat nicht nur die Wellenlänge der Strahlung vergrößert, sondern diese zugleich stark geschwächt. Es schien damals unmöglich, das Signal aus der Kakophonie der übrigen Radiofrequenzen aus der Milchstraße sowie der auf der Erde künstlich erzeugten herauszufiltern.

Die Idee, den jungen Kosmos mit Hilfe der 21-Zentimeter-Strahlung zu kartieren, fand drei Jahrzehnte lang kaum Beachtung. Aber in den vergangenen Jahren ließen technische Fortschritte die Methode zusehends machbar erscheinen. Die grundlegenden Konstruktionen haben sich dabei nicht geändert: Radioteleskope bestehen seit jeher aus einfachen Materialien wie Kunststoffrohren und Drahtgittern. Die damit empfangenen Signale lassen sich heute allerdings wesentlich besser verarbeiten. Bauteile, die ursprünglich für Spielkonsolen, Mobiltelefone und andere Unterhaltungselektronik für den Massenmarkt entwickelt wurden, erlauben es inzwischen, bei geringen Kosten mit immensen Datenmengen umzugehen. Parallel zu dieser Entwicklung haben theoretische Kosmologen detaillierte und überzeugende Konzepte dazu ersonnen, was genau die 21-Zentimeter-Spektrallinie verraten könnte.

Die kosmische Entwicklung hinterließ Spuren im Signal des Wasserstoffs

Unmittelbar nach der Entstehung des atomaren Wasserstoffs war das einzige Licht im All jenes, das uns heute gleichmäßig aus allen Richtungen als schwache, langwellige kosmische Hintergrundstrahlung erreicht. Vor knapp 14 Milliarden Jahren war seine Wellenlänge allerdings erheblich kleiner und hätte menschlichen Augen ein einheitliches Orange geboten. Langsam wäre das Licht weniger intensiv und rötlicher erschienen und schließlich im Infrarotbereich verschwunden – das Universum wurde dunkel. Und es gab noch nichts, das sichtbare Strahlung hätte erzeugen können. Deshalb nennen Kosmologen die Epoche das dunkle Zeitalter.

Im Verlauf der Zeit, so vermuten Theoretiker, müsste das sich entwickelnde Universum drei deutliche Spuren im Signal des Wasserstoffs hinterlassen haben. Die erste Veränderung begann etwa fünf Millionen Jahre nach dem Urknall. Die Atome hatten sich inzwischen so weit abgekühlt, dass sie mehr Strahlung absorbierten als aussandten. Das sollte die Intensität der Hintergrundstrahlung bei einer bestimmten Wellenlänge absenken (siehe »Irdischer Blick aufs junge All«, rechts).

Bei einem zweiten Vorgang etwa 200 Millionen Jahre später hatte sich die Materie bereits in einigen Regionen stark angesammelt. Die ersten Galaxien und Sterne waren schon entstanden und entsandten ultraviolette Strahlung in den intergalaktischen Raum. Das brachte den dort befindlichen Wasserstoff in einen Zustand, in dem er mehr von der

umgebenden 21-Zentimeter-Strahlung absorbieren konnte. Als Folge dieser kosmischen Morgendämmerung erwarteten die Astronomen eine zweite Absenkung der Intensität der Hintergrundstrahlung. Sie liegt entsprechend dem damaligen Alter des Kosmos bei einer etwas kleineren Wellenlänge. Genau diese Mulde im Intensitätsverlauf scheint EDGES aufgespürt zu haben.

Eine halbe Milliarde Jahre nach dem Urknall durchlief der Wasserstoff dann eine noch dramatischere Veränderung: Die ultraviolette Strahlung der Sterne und Galaxien wurde nun intensiv genug, um den Wasserstoff zur Fluoreszenz anzuregen – er begann selbst, Photonen mit einer Wellenlänge von 21 Zentimetern auszusenden. jener Wasserstoff, der sich am nächsten an den jungen Galaxien befand, absorbierte von diesen so viel Energie, dass die Atome ihre Elektronen verloren. Sie wurden wieder unsichtbar. Die dunklen Blasen dergestalt ionisierten Wasserstoffs wuchsen im Verlauf einer weiteren halben Milliarde Jahre weiter an. Während die Galaxien miteinander verschmolzen und größer wurden, blieb zwischen ihnen immer weniger leuchtender Wasserstoff zurück. Heute ist der größte Teil des Wasserstoffs im Kosmos ionisiert. Kosmologen bezeichnen den Übergang als Epoche der Reionisierung.

Auf diese Zeit zielen viele der derzeit laufenden und der geplanten radioastronomischen 21-Zentimeter-Untersuchungen ab. Die Forscher möchten den Verlauf der Reionisierung in drei Dimensionen abbilden, indem sie Schnappschüsse des Himmels bei verschiedenen Wellenlängen anfertigen. Das entspricht unterschiedlichen Rotverschiebungen der 21-Zentimeter-Spektrallinie. »Wir werden irgendwann einen vollständigen Film dieser Epoche erstellen«, hofft Emma Chapman, Astrophysikerin am Imperial College London.

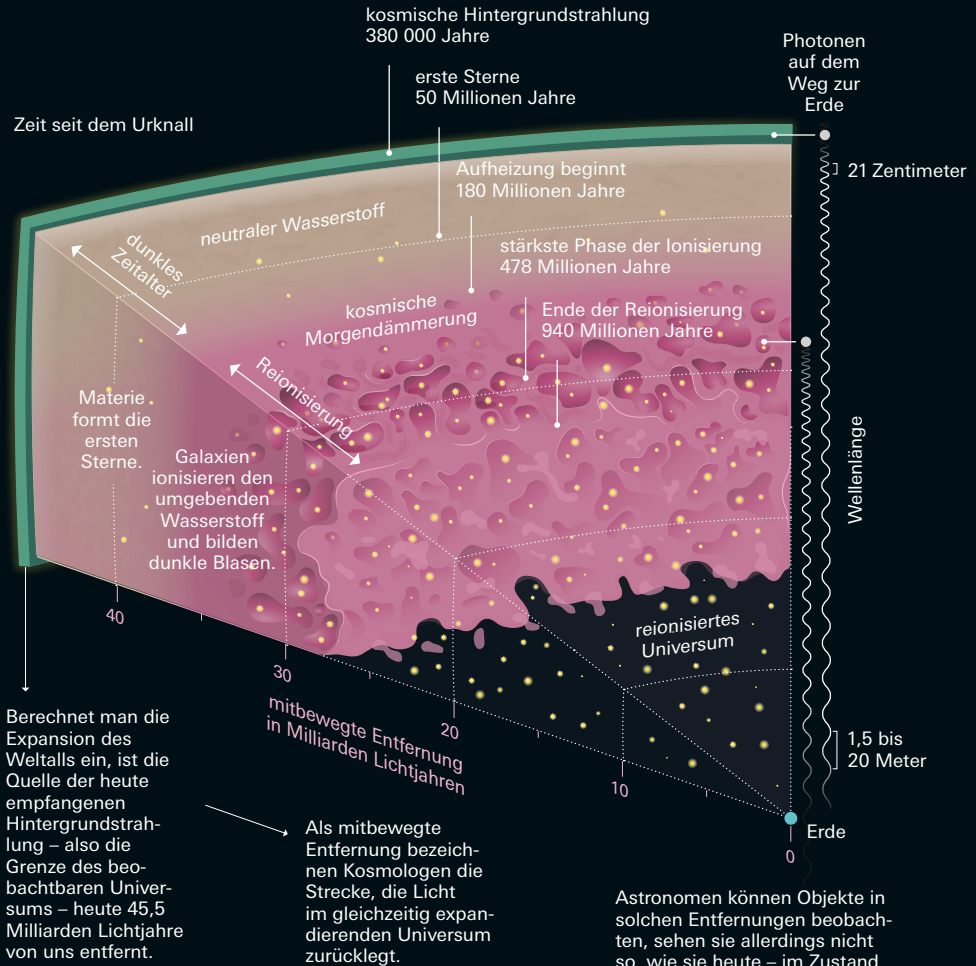
Einzelheiten der Entstehung der ionisierten Blasen, ihre Form und ihr Wachstum sollen Rückschlüsse auf den Werdegang der Galaxien erlauben. Wenn Sterne den Hauptanteil zur Reionisierung geliefert haben, dann dürften die Blasen einfache, regelmäßige Formen besitzen, so Chapman. »Wenn es aber viele Schwarze Löcher gab, dann wuchsen sie schneller und unregelmäßiger«, weil die Strahlung aus der Umgebung der Schwarzen Löcher energiereicher und durchdringender ist als jene der Sterne.

Die Epoche der Reionisierung eignet sich zudem besonders gut, um die aktuell besten Modelle der kosmischen Evolution zu überprüfen. Trotz reichlicher Hinweise auf die Dunkle Materie weiß bislang niemand, worum es sich bei dem Stoff genau handelt. Die Strahlung könnte Indizien dazu liefern, ob Dunkle Materie eher aus relativ schweren und langsamen, »kalten« Teilchen besteht – das ist das heute favorisierte Modell – oder aus »warmen«, leichteren und schnelleren.

Erst in jüngster Zeit steht Astronomen die Technik zur Verfügung, mit der sich Strahlung aus der Epoche der Reionisierung nachweisen lässt. Die wichtigste Rolle dabei spielen Interferometer: Anlagen aus vielen einzelnen, aber miteinander gekoppelten Radioantennen. Der Vergleich der an den jeweiligen Antennen empfangenen Signale offenbart Unterschiede bei der Intensität der Strahlung in verschiedene Richtungen am Himmel.

Irdischer Blick aufs junge All

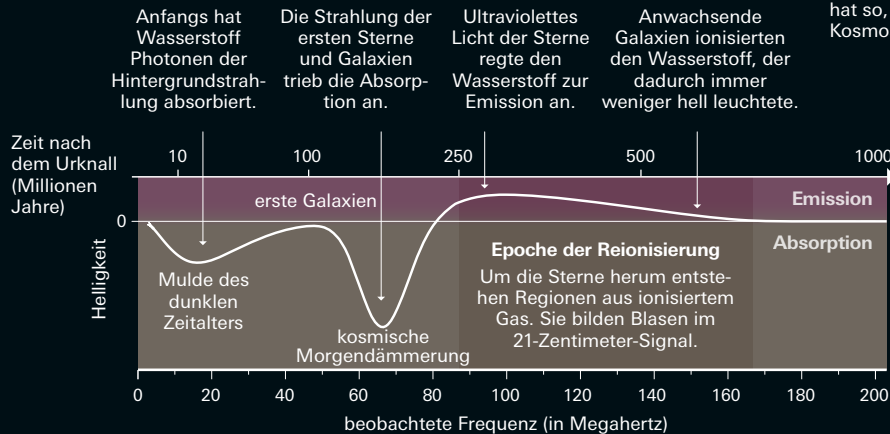
Je tiefer Astronomen ins Weltall blicken, desto weiter schauen sie zugleich zurück in die Zeit. Das älteste beobachtbare Signal ist die kosmische Hintergrundstrahlung aus der Zeit, in der das Universum gerade einmal 380 000 Jahre alt war. Damals vereinten sich Protonen und Elektronen zu Wasserstoffatomen. Deren Geschichte lässt sich anhand der von ihnen ausgesandten oder absorbierten Strahlung verfolgen. Die charakteristische Strahlung von Wasserstoff hat eine Wellenlänge von 21 Zentimetern. Sie nimmt jedoch an der Expansion des Weltalls teil und vergrößert sich bis zur Beobachtung auf der Erde entsprechend. Deshalb können Astronomen mit dem Signal die Entwicklung des Universums vom dunklen Zeitalter vor der Entstehung der ersten Sterne bis heute kartieren: Je jünger das All zum Entstehungszeitpunkt der Strahlung war, desto niedriger ist ihre Frequenz.



Astronomen können Objekte in solchen Entfernungen beobachten, sehen sie allerdings nicht so, wie sie heute – im Zustand der mitbewegten Entfernung – aussehen. Vielmehr erscheinen sie uns entsprechend der Zeit, die ihr Licht zu uns gebraucht hat so, wie sie im jungen Kosmos ausgesehen haben.

Atomare Spurensuche

Die Kurve zeichnet die Gesamtintensität des 21-Zentimeter-Signals im Verlauf der ersten Jahrmilliarde der kosmischen Geschichte nach.

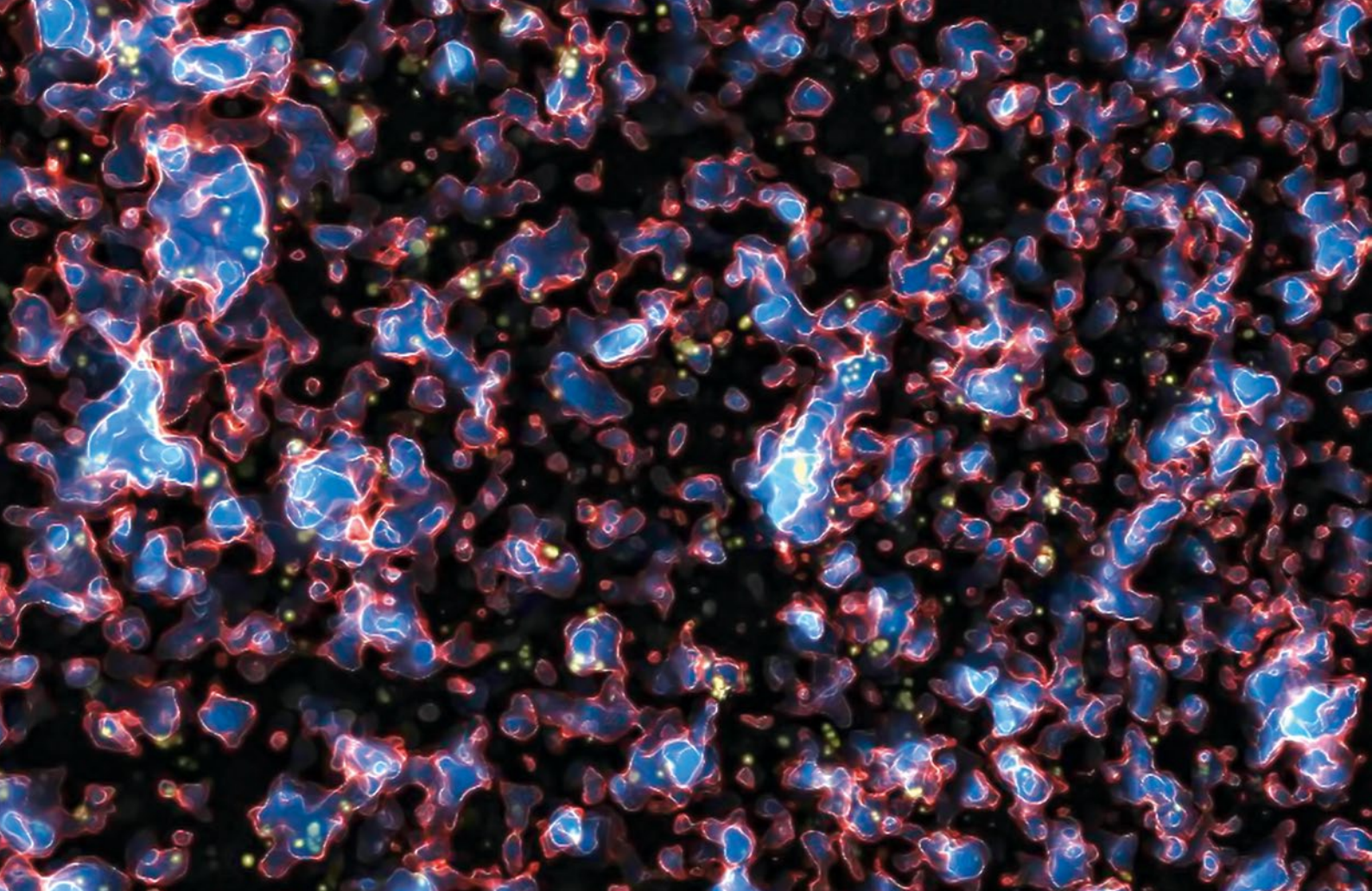


MW SPECTROSCOPY, CASTELVECCHI, D. INTO THE DARK AGES. NATURE 572, 2019. (RIGHT) MURCHISON WIDEFIELD ARRAY. PRITCHARD, J.B., LOEB, A. CONSTRAINING THE UNEXPLORED PERIOD BETWEEN THE DARK AGES AND REIONIZATION WITH OBSERVATIONS OF THE GLOBAL 21 CM SIGNAL. PHYSICAL REVIEW D 82, 2010. FIG. 1

Zu den modernsten Interferometern zählt LOFAR (Low Frequency Array). Seine Antennen sind über viele europäische Länder verstreut, wobei das Zentrum nahe der niederländischen Stadt Exloo liegt. Es ist das derzeit weltweit größte Radioobservatorium für niedrige Frequenzen. Dennoch konnte es bislang lediglich grobe Grenzwerte für die Größenverteilung der Blasen liefern. Immerhin ließen sich damit bereits extreme Modelle ausschließen, in denen beispielsweise ein Teil des intergalaktischen Mediums

besonders kalt ist, erläutert Léon Koopmans von der Universität Groningen in den Niederlanden. Er leitet die LOFAR-Beobachtungen zur Epoche der Reionisierung. Im September 2019 gelang es der Konkurrenz vom MWA (Murchison Widefield Array) in der Wüste von Westaustralien nach einer technischen Aufrüstung, diese Grenzen noch enger zu ziehen.

In Zukunft dürften die besten Aussichten für eine tatsächliche Messung – im Gegensatz zur Bestimmung von



In einer Simulation der Epoche der Reionisierung sendet das ionisierte Gas um junge Galaxien (hellblau) nicht länger 21-Zentimeter-Strahlung aus. Neutraler Wasserstoff ist dunkel eingezeichnet.

Grenzwerten – der statistischen Eigenschaften der Epoche der Reionisierung bei der Anlage HERA (Hydrogen Epoch of Reionization Array) liegen. Sie besteht aus 300 Parabolantennen in der südafrikanischen Provinz Nordkap. Während es sich bei LOFAR und MWA um Allzweckobservatorien für große Wellenlängen handelt, ist HERA für den Empfang der Strahlung von Wasserstoff im jungen Kosmos optimiert. Die eng beieinanderstehenden Antennen mit jeweils 14 Meter Durchmesser decken den Frequenzbereich von 50 bis 250 Megahertz ab. Theoretisch sollte HERA damit sowohl die Abschwächung während der Ära sehen können, in der das Licht der ersten Galaxien den Kosmos erhellte, als auch die Epoche der Reionisierung.

Wie jedes Experiment dieser Art hat auch HERA mit störender Strahlung aus der Milchstraße zu kämpfen. So betont Aaron Parsons, Radioastronom an der University of California in Berkeley und Chefwissenschaftler von HERA, die Radiosignale aus der Galaxis und anderen Galaxien seien 1000-mal stärker als die Spektrallinie des Wasserstoffs aus dem frühen Universum. Glücklicherweise besitzt die Radiostrahlung der Milchstraße ein vorhersagbares Spektrum, das sich vom Gesamtsignal abziehen lässt, um die gesuchte kosmologische Strahlung zu finden. Das

ist nur möglich, wenn die Radioastronomen exakt wissen, wie ihr Instrument auf die verschiedenen Wellenlängen reagiert. Ähnlich wie die Empfangsqualität bei einem UKW-Radio davon abhängen kann, wo genau man sich im Zimmer befindet, sorgen kleinste Veränderungen in der Umgebung – etwa die Zunahme der Feuchtigkeit im Boden oder der Beschnitt naher Büsche – für eine andere Empfindlichkeit.

Wenn alles nach Plan geht, will Parsons mit dem HERA-Team bereits Anfang der 2020er Jahre erste Ergebnisse zur Epoche der Reionisierung vorliegen haben. Und Nichole Barry, Astrophysikerin an der University of Melbourne und Mitglied des MWA-Teams, zeigt sich geradezu enthusiastisch: »Sobald die systematischen Effekte im Griff sind, wird HERA empfindlich genug für einen echten Durchbruch sein. Dann benötigt eine einzelne Messung nur wenig Zeit.«

Ähnlich wie alle anderen existierenden Interferometer wird auch HERA noch keine dreidimensionale Karte der Epoche der Reionisierung produzieren. Hier liegt die größte Hoffnung auf dem geplanten SKA (Square Kilometre Array), einer Anlage, die in den 2020er Jahren in Australien und Südafrika entstehen soll. Es wird sich um das anspruchsvollste je konstruierte Radioobservatorium handeln. Der australische Teil soll Frequenzen von 50 bis 350 Megahertz entsprechend den Wasserstoffsignalen aus dem frühen All empfangen. Die Hälfte in Südafrika wird auf höhere Frequenzen ausgerichtet sein.

Trotz der Tendenz zu immer größeren und teureren Projekten gibt es auch bescheidenere Ansätze. Viele davon

sammeln ihre Daten mit einer einzigen Antenne. Die Forscher analysieren damit eine bestimmte Eigenschaft der Strahlung gemittelt über den gesamten Himmel. Wegen ihres geradezu primitiven Aufbaus bezeichnet Lincoln Greenhill, Radioastronom am Center for Astrophysics im US-amerikanischen Cambridge, die Ausrüstung als »Cro-Magnon-Antennen«. Allerdings investieren die beteiligten Forscher Jahre in die Feinabstimmung der Geräte und in Computermodelle für die systematischen Effekte. Greenhill, der das Projekt LEDA (Large-Aperture Experiment to Detect the Dark Ages) leitet, spricht von »einer masochistischen Obsession«. Häufig reist der Wissenschaftler selbst zu den Antennen von LEDA im Owens Valley in Kalifornien, um dort etwa Metallreflektoren im Wüstensand auszulegen und andere Verbesserungsarbeiten zu erledigen.

Ein überraschend ausgeprägtes Signal widerspricht bisherigen Modellen

Solche technischen Feinheiten sind mit daran schuld, dass Astronomen den Ergebnissen von EDGES bislang mit vorsichtiger Skepsis begegnet sind. Das von diesem ebenfalls einfach aufgebauten Instrument aufgespürte Signal ist nämlich unerwartet stark. Demnach müsste das Wasserstoffgas 200 Millionen Jahre nach dem Urknall erheblich kühler gewesen sein, als die Theorie vorhersagt: etwa vier statt sieben Kelvin. Seit der Veröffentlichung der Ergebnisse Anfang 2018 haben Theoretiker Dutzende von Arbeiten publiziert und darin Mechanismen zur Abkühlung des Gases vorgeschlagen. Doch viele Radioastronomen – darunter das EDGES-Team selbst – wollen die Ergebnisse zunächst unabhängig bestätigt sehen, bevor sie sie akzeptieren.

Genau das soll mit LEDA und anderen Experimenten in teilweise noch unzugänglicheren Regionen geschehen. Ravi Subrahmanyan vom Raman Research Institute im indischen Bangalore beispielsweise arbeitet mit der kleinen, sphärischen Antenne SARAS 2. Sie steht im Hochland von Tibet, könnte in Zukunft aber vielleicht auf einem Floß in der Mitte eines Sees verankert werden. Das Wasser gibt im Gegensatz zum Erdboden »die Sicherheit, unter der Antenne ein homogenes Medium zu haben«, sagt Subrahmanyan. Das vereinfache es, das Verhalten der Antenne bei verschiedenen Frequenzen zu verstehen.

Die Physikerin Hsin Cynthia Chiang und ihre Kollegen an der Universität von KwaZulu-Natal im südafrikanischen Durban wählten für ihr Experiment die Marion-Insel auf halbem Weg zwischen Südafrika und der Antarktis. Chiang, die jetzt an der McGill University im kanadischen Montreal tätig ist, reist inzwischen außerdem zur Axel-Heiberg-Insel in der kanadischen Arktis. Dort hoffen sie und ihr Team, Strahlung bis hinunter zu 30 Megahertz aus dem dunklen Zeitalter nachzuweisen.

Bei derart niedrigen Frequenzen wirkt sich auch die Hochatmosphäre auf die Messungen aus. Der beste Ort für Beobachtungen in diesem Bereich könnte darum der 3200 Meter hoch gelegene Eisdome Dome Charlie in der Ostantarktis sein, hofft Greenhill. Von dort aus befänden sich die störenden Polarlichter unterhalb des Horizonts. Andere Radioastronomen richten ihre Hoffnungen auf

Observatorien im Weltall, vielleicht sogar auf der erdabgewandten Seite des Mondes. »Das ist die einzige hinsichtlich Radiostrahlung ruhige Region im inneren Sonnensystem«, erläutert der Astrophysiker Jack Burns von der University of Colorado in Boulder. Er spielt eine führende Rolle bei Vorschlägen für ein einfaches Radioteleskop in einer Mondumlaufbahn sowie für ein von einem robotischen Rover zu installierendes Interferometer auf der Oberfläche des Erdtrabanten.

Mit konventionelleren Methoden sind Forschern bereits kleine Vorstöße in die erste Jahrmilliarde der kosmischen Geschichte gelungen. Dabei haben sie Galaxien und Quasare entdeckt. Quasare sind von Schwarzen Löchern angetriebene Leuchtfeuer und zählen zu den leuchtstärksten Phänomenen des Kosmos. Künftige Instrumente, insbesondere das James-Webb-Weltraumteleskop, dessen Start die US-Raumfahrtbehörde NASA für 2021 vorsieht, werden weitere derartige Entdeckungen liefern. In der absehbaren Zukunft gelangen so aber nur einige der hellsten Objekte ins Visier.

Kosmologen hoffen indes auf eine vollständige Durchmusterung des Himmels, eine detaillierte dreidimensionale Karte des Wasserstoffs nicht nur während der Epoche der Reionisierung, sondern bis zurück ins dunkle Zeitalter. In Folge der kosmischen Expansion macht die sichtbare erste Jahrmilliarde des Kosmos etwa 80 Prozent seines heutigen Volumens aus. Die bislang besten Kataloge der Galaxienverteilung, die vor allem nähere und hellere Objekte erfassen, enthalten hingegen gerade einmal ein Prozent, betont der Kosmologe Max Tegmark vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge. Loeb, Tegmark und weitere Kollegen in Cambridge haben ausgerechnet, dass die Schwankungen der Wasserstoffdichte vor der Epoche der Reionisierung mehr Informationen tragen als die kosmische Hintergrundstrahlung – und die war bislang der Goldstandard für die Bestimmung der grundlegenden Eigenschaften des Universums. Dazu zählen dessen Alter, der Anteil an Dunkler Materie und seine geometrische Gestalt. Die technische Herausforderung ist enorm. Aber eine derartige Kartierung wäre für die Forschung ein immenser Gewinn, sagt Loeb: »Das 21-Zentimeter-Signal bietet uns den umfangreichsten Datensatz über das Universum, der uns jemals zugänglich sein wird.« ◀

QUELLEN

Barry, N. et al.: Improving the epoch of reionization power spectrum results from Murchison Widefield Array season 1 observations. *Astrophysical Journal* 884, 2019

Bowman, J. D. et al.: An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum. *Nature* 555, 2018

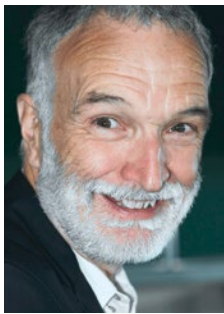
Loeb, A.: The optimal cosmic epoch for precision cosmology. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2012

Mao, Y. et al.: How accurately can 21 cm tomography constrain cosmology? *Physical Review D* 78, 2008

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 572, S. 298–301, 2019

SCHLICHTING! SCHNEEVERLUST UNTER DEM GEFRIERPUNKT



Manchmal verschwindet die Schneedecke, obwohl das Thermometer unter null Grad anzeigt. Oder aber sie schmilzt selbst bei Plusgraden kaum. Die Temperatur allein ist nicht entscheidend – bei den Vorgängen spielen weitere Einflüsse eine wichtige Rolle.

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

» spektrum.de/artikel/1693106

Oh welch ein Schreck: Der Schnee ist weg! Wo ist er nur geblieben?

Anita Menger (*1959)

Wenn uns der Winter Schnee beschert, wird die Schicht auch bei anhaltenden negativen Temperaturen gelegentlich dünner und verschwindet an einigen Stellen sogar ganz. Etwa nach dem Schneeschieben, wenn die zurückgebliebenen Reste sich anschließend in nichts auflösen scheinen. Schuld daran sind mechanische und thermodynamische Vorgänge, die weitgehend im Verborgenen stattfinden. Insbesondere spielen Wechselwirkungen zwischen den drei Aggregatzuständen des Wassers – fest, flüssig und gasförmig – eine entscheidende Rolle.

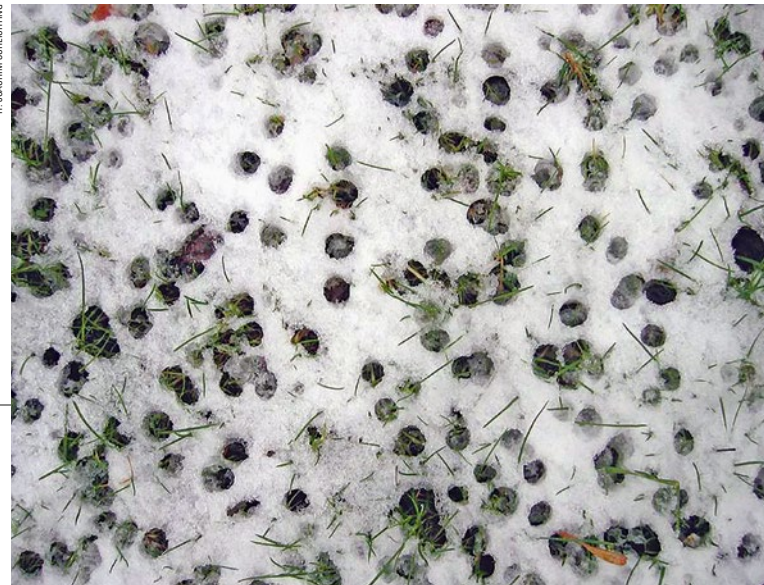
Das Volumen des Schnees nimmt bereits ab, kurz nachdem er gefallen ist. Eine frische, trockene Flockendecke hat zahlreiche Hohlräume und daher eine geringe Dichte. Bald darauf sackt das Gefüge unter dem eigenen Gewicht mehr und mehr in sich zusammen. Die Höhe wird geringer, und die Dichte wächst. Dafür sind unter anderem Sinterungsprozesse verantwortlich, bei denen sich die Verbindungen zwischen den einzelnen Kristallen neu organisieren (siehe »Knirschender Schnee«, »Spektrum« Januar 2018, S. 70). Dabei bleibt die Gesamtmasse aber noch überwiegend erhalten. Zu echten Schneeverlusten kommt es dann durch Wechselwirkungen zwischen dem Wasserdampf in der Atmosphäre und dem Schnee.

Strandurlauber kennen das Gefühl, wenn sich die Luft nach einem Bad im Meer kälter anfühlt. Die Wahrneh-

mung lässt sich objektiv untermauern: Umwickelt man beispielsweise den Sensor eines Thermometers mit einem feuchten Wattebausch, liest man eine niedrigere Temperatur ab als im trockenen Zustand. Es gibt spezielle Doppelthermometer, so genannte Psychrometer, die basierend auf diesem Prinzip neben der normalen Trockentemperatur die Feuchttemperatur anzeigen (siehe Illustration auf S. 80).

Die Verdunstung des Wassers entzieht der Umgebung Energie in Form von Wärme. Die Temperatur sinkt umso mehr, je geringer die relative Feuchte ist – das Verhältnis aus der tatsächlichen Konzentration von Wasserdampf und der bei der Temperatur maximal möglichen. Bei einer relativen Feuchte von 100 Prozent kondensiert genauso viel Wasser wie verdunstet. Die Temperatur, bei der das passiert, nennt man Taupunkt. Er liegt stets unterhalb der

Warme Regentropfen durchschlagen die Schneedecke und beschleunigen den Schmelzvorgang.





H. JACOBIN SCHLICHTING

Sonnenschein kann die Schneedecke trotz negativer Temperaturen allmählich schrumpfen lassen.

Feuchttemperatur, außer bei 100 Prozent relativer Feuchte. Nur dann sind normale Temperatur, Feuchttemperatur und Taupunkt gleich.

Bei niedrigen Plusgraden kann es vorkommen, dass die Feuchttemperatur negativ wird. Die entsprechende Seite des Psychrometers würde vereisen. Obendrein liegt dann die relative Feuchte unter 100 Prozent (sonst gäbe es keinen Temperaturunterschied), der Taupunkt ist also noch niedriger. In einem solchen Fall schmilzt der Schnee nicht, sondern er geht direkt von der festen in die gasförmige Phase über. Diese Sublimation ist umso stärker, je niedriger die relative Feuchte ist.

Schnee ist hartnäckig – nur mit Aufwand kann er entrinnen

Die Sublimation erfordert nicht nur die nötige Energie, um Wasser in den gasförmigen Zustand zu überführen (Verdampfungswärme), sondern zusätzlich die, um das Eis zu schmelzen (Schmelzwärme). Diese große Gesamtenergie wird zunächst der unmittelbaren Umgebung entzogen. Daraufhin kühlt sich insbesondere die Schneedecke weiter ab. Dadurch rückt aber zumindest lokal die Feuchttemperatur zusehends an den Taupunkt – der Sublimationsprozess wird langsamer und begrenzt sich selbst.

Falls die Feuchttemperatur positiv ist und der Taupunkt negativ, schmilzt der Schnee mit einer Temperatur von null Grad Celsius an der Grenzschicht zur Luft. Er wird von einem dünnen Wasserfilm bedeckt. Entsprechend ist die relative Feuchte in diesem Bereich sehr

groß, und der Taupunkt ist schnell erreicht. Der Vorgang entzieht der Umgebung, das heißt hier vor allem dem gerade entstandenen Wasser, viel Energie. Teilweise gefriert es wieder, und im neu hervorgegangenen Gleichgewicht kommt der Schneeverlust bald zum Erliegen.

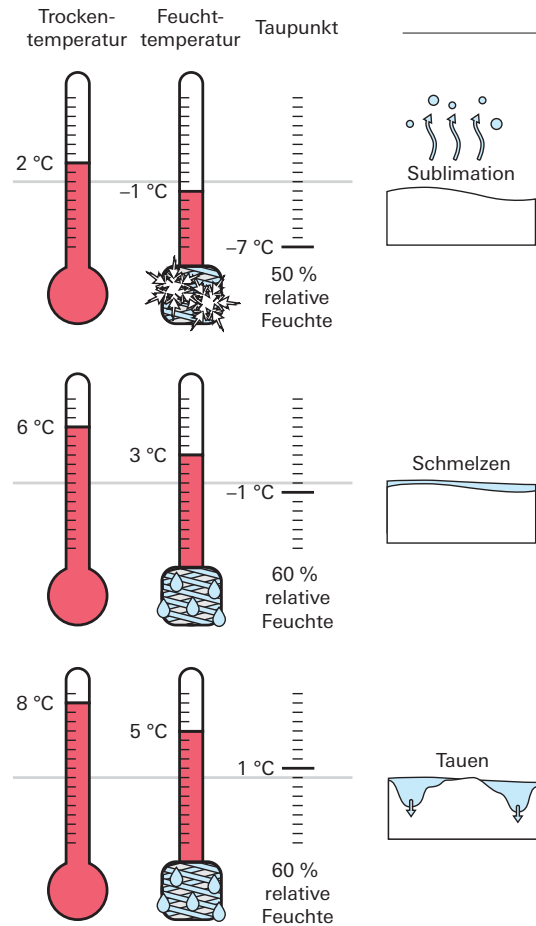
Diese Blockade wird erst überwunden, wenn der Taupunkt einen positiven Wert annimmt. Das Schmelzen des Schnees sorgt nun zwar ebenfalls für eine Abkühlung, aber er wird nicht erneut fest. Jetzt taut es: Die flüssige Phase nimmt kontinuierlich zu, während die fortschreitende Benetzung des Schnees den Vorgang noch beschleunigt. Denn indem das kalte Oberflächenwasser im Schnee versickert, geraten die frei gelegten Schneeflächen jeweils direkt mit der noch wärmeren Luft in Verbindung. Das ist wesentlich effektiver als das bloße Schmelzen bei negativem Taupunkt.

Für einen im Wortsinn weitaus durchschlagenderen Taueffekt sorgt die Zufuhr von Wasser. Das passiert bei Regen: Die fallenden Tropfen dringen (sofern es sich nicht gerade um unterkühlten Eisregen handelt) wegen der großen Wärmekapazität des Wassers oft tief in den Schnee ein und durchlöchern ihn (siehe Foto links). Das vergrößert die Oberfläche des Schnees stark und gibt der Luft Gelegenheit, im Inneren Energie auszutauschen und den Tauvorgang zu beschleunigen. Die wachsenden Löcher lassen schließlich außerdem die Sonne bis zum dunkleren Boden vordringen. Dieser absorbiert die Strahlung und heizt damit zusätzlich von unten. So kann letztendlich, selbst wenn die Umgebungstemperatur unter null Grad liegt, beispielsweise ein Stück frei gelegter Asphalt im Sonnenlicht sich über den Gefrierpunkt hinaus erwärmen und Schneeresten in der Umgebung zusetzen.

Umwickelt man ein (gut belüftetes) Thermometer mit einem feuchten Stoff, wird ihm durch Verdunstung Wärme entzogen. Es zeigt einen niedrigeren Wert als im trockenen Zustand. Aus der Differenz lässt sich die relative Luftfeuchtigkeit errechnen sowie der Taupunkt, bei dem die Wasserdampfkonzentration in der Luft maximal wäre. Ist die »trockene« Temperatur positiv und die »feuchte« negativ (oben), wird Schnee direkt gasförmig (Sublimation). Zeigen beide Thermometer Plusgrade bei negativem Taupunkt, schmilzt er ein wenig (Mitte). Erst, wenn alle drei Werte positiv sind, taut der Schnee. Dann zerfließt er rasch (unten).

Bei dickeren Schneedecken, die länger an Ort und Stelle bleiben, beschleunigen Verunreinigungen durch Staub und Schmutz das Tauen. Die dunklen Stellen sind gute Absorber von Strahlung und folglich zwar winzige, aber in ihrer großen Zahl wirkungsvolle Lieferanten von Schmelzenergie (siehe »Zwischen weißer Pracht und Schmutzskulptur«, »Spektrum« Februar 2016, S. 48).

In der Nähe des tauenden Schnees steigt die Wasserdampfproduktion an, wodurch sie sich selbst bremst. Wenn allerdings Wind Luft heranführt, kann das den Schwund sehr effektiv antreiben. Darum bleibt Schnee nicht nur an den sonnen-, sondern auch an den windgeschützten Stellen merklich länger liegen. Wer abschätzen will, wie lange das winterliche Weiß erhalten bleibt, sollte also mehr als nur das Thermometer im Blick behalten.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Natalie Schäfer

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

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

Redaktionsassistent: Katharina Boehm, Andrea Roth

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Rainer Kayser, Christine Kemmet, Maxime Pasker, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, 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 € 8,90 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,-; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,-. PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

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

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

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-741

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 41 vom 1.1.2020.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft

mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2020 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Acting Editor in Chief: Curtis Brainard, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President Magazines: Stephen Pincock



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





FREISTETTERS FORMELWELT VOLLKOMMEN LOGISCH

Das Internet steckt voller Informationen. Um aber diejenigen zu finden, die einen wirklich interessieren, braucht man gute Suchmaschinen – und die richtige Mathematik.

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

» spektrum.de/artikel/1693108

Als Wissenschaftsautor muss ich viel recherchieren. Das mache ich ganz klassisch in Büchern, aber noch öfter im gewaltigen Fundus des Internets. Doch nicht immer finde ich dort, was ich suche. Möchte ich beispielsweise etwas über die Kreiszahl Pi erfahren, dann hat die Mehrheit der Resultate, die mir die gängigen Suchmaschinen liefern, nichts mit Mathematik zu tun, sondern mit dem Mini-computer Raspberry Pi. Und wenn ich nach »Galaxy« suche, muss ich mich durch etliche Treffer zum gleichnamigen Smartphone wühlen.

Diese Probleme kann man durch den geschickten Einsatz logischer Verknüpfungen umgehen. Sie beschreiben Rechenregeln, die nicht mit den üblichen Symbolen für Addition, Subtraktion, Multiplikation oder Division arbeiten, sondern mit Operatoren, die UND, ODER sowie NICHT heißen. Will ich etwa aus allen Internetseiten, die das Wort Pi enthalten, nur diejenigen finden, in denen nicht auch das Wort Raspberry vorkommt, muss ich die beiden Suchbegriffe durch passende Operatoren verknüpfen.

Für diese kann man ähnliche Gesetze aufstellen wie für das »normale« Rechnen. Man findet auch ein Kommutativ- sowie ein Assoziativgesetz und so weiter. Zu den bekanntesten Regeln für logische Aussagen gehören die so genannten de-morganschen Gesetze, benannt nach dem englischen Mathematiker Augustus De Morgan (1806–1871):

$$\neg(a \wedge b) = \neg a \vee \neg b$$

$$\neg(a \vee b) = \neg a \wedge \neg b$$

Das Symbol, das wie ein Inbusschlüssel von Ikea aussieht, steht für den logischen Operator NICHT, der mit der Spitze nach oben zeigende Winkel bedeutet UND,

und der mit der nach unten gerichteten Spitze entspricht ODER.

Die de-morganschen Gesetze bedeuten demnach, dass NICHT (a UND b) identisch mit der Aussage (NICHT a) ODER (NICHT b) ist; beziehungsweise dass NICHT (a ODER b) das Gleiche ist wie (NICHT a) UND (NICHT b). Wenn ich zum Beispiel Webseiten nach dem Auftreten der Wörter Galaxy und Smartphone untersuchen möchte, kann ich alle Seiten in vier Gruppen einteilen: In der ersten sind solche, die nur das Wort Smartphone enthalten; in der zweiten jene, in denen lediglich das Wort Galaxy vorkommt; dann diejenigen mit beiden Begriffen; und schließlich die Seiten, in denen weder der eine noch der andere erscheinen.

Als Astronom interessiert mich die letzte Gruppe, die sich mit der Suche nach NICHT (Smartphone ODER Galaxy) identifizieren lässt, am wenigsten. De Morgans zweite Regel besagt, dass (NICHT Smartphone) UND (NICHT Galaxy) die gleiche Gruppe liefert. Was auch der Fall ist: Die Webseiten ohne das Wort Smartphone gehören zu den Gruppen 2 und 4; diejenigen ohne Galaxy tauchen in den Gruppen 1 und 4 auf. Durch die Verknüpfung UND bleibt dann nur die letzte Gruppe übrig.

Für dieses schlichte Beispiel würde man in der Praxis einfachere logische Verknüpfungen verwenden als die de-morganschen Regeln. Bei komplexen Suchanfragen sind diese jedoch wichtig. Ebenso braucht man sie, wenn man Algorithmen programmiert oder digitale elektronische Elemente entwickelt, etwa bei der Konstruktion so genannter Logikgatter für Computer. Dabei führen mehrere binäre Input-Kanäle zu einem gewissen Output: Eine UND-Schaltung liefert nur dann den Wert 1, wenn an allen Eingängen eine 1 anliegt; ein ODER-Gatter gibt dagegen eine 1 aus, wenn mindestens ein Eingang eine 1 enthält.

Die de-morganschen Regeln sehen zwar einfach aus, doch Computer brauchen genau solche simplen Gesetze, um zu funktionieren.

WISSENSCHAFTSPHILOSOPHIE WIE UNIVERSELL SIND NATURGESETZE?

Die fundamentalen Regeln der Physik gelten nur unter idealisierten Bedingungen exakt – die es praktisch nie gibt. Ist trotzdem ein befriedigendes Verständnis der Vorgänge möglich?



Alexander Mäder ist promovierter Philosoph, arbeitet als Wissenschaftsjournalist und lehrt an der Hochschule der Medien in Stuttgart.

► [spektrum.de/artikel/1693110](https://www.spektrum.de/artikel/1693110)



Die Firma Thomson Reuters GFMS schätzt, dass alle Menschen insgesamt rund 190 000 Tonnen Gold besitzen. Zusammengenommen ergäbe das eine Kugel von 26 Meter Durchmesser. Das sollten Sie wissen, bevor wir uns der Frage zuwenden, ob es im Universum eine Goldkugel von einem Kilometer Durchmesser gibt. Diese Frage zitieren Philosophen seit Jahrzehnten immer wieder gerne, weil sie damit deutlich machen können, wonach die Wissenschaft strebt. Es geht also um viel; bleiben Sie bitte am Ball.

Genug Gold wäre im Kosmos jedenfalls vorhanden. Allein bei der Kollision der beiden Neutronensterne, deren Gravitationswellen am 17. August 2017 auf der Erde nachgewiesen wurden, ist so viel des Elements entstanden, dass es für Dutzende oder sogar Hunderte von Planeten von der Größe der Erde gereicht hätte. Aber das Metall wurde in einer gewaltigen Explosion im All verteilt. Sofern sich keine außerirdische Intelligenz daran macht, es einzusammeln und zu verschmelzen, dürfte es im Universum daher keine Goldkugel mit einem Kilometer Durchmesser geben.

Und nun kommt die zweite, entscheidende Frage der Philosophen: Gibt es eine ebenso große Kugel, die vollständig aus angereichertem Uran besteht? Uran ist im Universum seltener als Gold, doch auch hiervon wäre genug vorhanden. Allerdings stößt man auf eine zusätzliche Schwierigkeit, sollte man das Uran zusammenbringen, weil man die so genannte kritische Masse überschreiten würde – die Kugel würde mit der Kernspaltung beginnen, eine Menge Energie freisetzen und explodieren. Es gibt deswegen nach allem, was man weiß, weder eine kilometergroße Kugel aus Gold noch eine aus Uran. Doch beim Gold hat man es prinzipiell selbst in der Hand, sie eines Tages zu erschaffen, während im Fall des Urans ein grundlegender Mechanismus dies verhindert.

Die Frage, wie groß eine Goldkugel sein kann, ist daher wissenschaftlich weniger interessant als die entsprechende Frage nach einer Urankugel. Die Forschung will schließlich nicht Aussagen formulieren, die einfach nur wahr sind – sondern solche, die notwendigerweise wahr sind, weil sie einen Teil des Regelwerks beschreiben, nach dem alle physikalischen Prozesse ablaufen. Die Feststellung, dass es keine kilometergroße Kugel aus Uran gibt, könnte also ein Naturgesetz sein oder zumindest eine Ableitung von einem solchen; die Aussage, dass keine aus Gold existiert, stimmt hingegen höchstens zufällig.

Die Physik kennt viele Naturgesetze, vom ohmschen Gesetz über die Hauptsätze der Thermodynamik bis zur Schrödingergleichung. Auch in anderen Fächern werden Gesetze formuliert: Darwins Selektionsmechanismus in der Evolution zum Beispiel oder die Aussage aus der Volkswirtschaftslehre, laut der die Preise steigen, wenn man das Angebot reduziert. In diesem Beitrag wollen wir genauer beschreiben, was solche Regeln auszeichnet – und an der landläufigen Vorstellung von Naturgesetzen Zweifel säen.

Die Frage, ob eine kilometergroße Goldkugel existiert, klingt zunächst befremdlich. Aber Philosophen verdeutlichen damit Grundprinzipien der Wissenschaft.

SERIE

Grundbegriffe der Wissenschaft

Alexander Mäder

Teil 1: Februar 2020

Wie universell sind Naturgesetze?

Teil 2: März 2020

Gute Theorien, schlechte Theorien

Teil 3: April 2020

Experimente und Daten

Bleiben wir bei der Physik (für andere Disziplinen siehe »Naturgesetze in der Psychologie?«, S. 85). Dort regeln die Naturgesetze – so stellt man es sich gemeinhin vor – alle Abläufe im Universum, und sie gelten auf der Erde ebenso wie auf dem Mars und in der Andromeda-Galaxie. Man kann nicht gegen sie verstoßen wie gegen ein von der Regierung erlassenes Gesetz. Und weil sie die Zusammenhänge von Ursache und Wirkung beschreiben, lässt sich mit ihrer Hilfe erklären, warum ein Ereignis ein anderes hervorbringt, warum etwa bei der Kollision der beiden Neutronensterne Gravitationswellen entstanden sind. Man kann sogar sagen, wie sich Dinge unter hypothetischen Bedingungen entwickeln würden und wie etwas, das in Zukunft geschehen wird, schon aus dem heutigen Zustand ableitbar ist.

Was sind Regeln wert, wenn sie unter Bedingungen gelten, die praktisch nie erfüllt sind?

Wir wollen uns nicht in die Frage vertiefen, ob die Unbestimmtheit der Quantenmechanik diesen Determinismus beeinträchtigt. Ebenso wenig ist unser Thema, ob sich die Physiker ihrer Naturgesetze sicher sein können (damit beschäftigen wir uns noch in den nächsten Teilen der Serie). Stattdessen gehen wir davon aus, dass diese korrekt formuliert sind, und stellen eine Frage, die Philosophen seit Langem umtreibt: Handelt es sich wirklich um unbeugbare Gesetze der Natur?

Selbst ohne umfangreichen physikalischen Sachverstand kann man skeptisch werden. Das erste newtonsche Gesetz besagt zum Beispiel, dass ein Körper, auf den keine Kräfte wirken, entweder ruht oder sich geradlinig mit gleich bleibender Geschwindigkeit fortbewegt. Doch auf jedes Objekt im All wirken eine Menge Kräfte ein, Newtons Gesetz trifft daher auf gar nichts zu. Was ist dann davon zu halten?

Das Problem ist schon Galileo Galilei aufgefallen, als er vom »großen Buch der Natur« sprach, in das wir täglich schauen. Damit meinte er das Universum. Es sei zwar in der exakten Sprache der Mathematik geschrieben, die könne man allerdings nicht einfach so auf die physikalische Welt übertragen. Die Realität bilde nur ungefähr ab, was die Mathematik sage. In seinem »Dialog« diskutiert Galilei das am Beispiel einer Kugel, die in der Geometrie eine Ebene nur in einem Punkt berührt. In Wirklichkeit gebe es aber keine so perfekten Kugeln und Ebenen. In diesem Sinn formulierte Galilei auch sein Fallgesetz: Nur, wenn man sich

AUF EINEN BLICK REGELWERK MIT EINSCHRÄNKUNGEN

- 1 Wenn wir über Wissenschaft sprechen, nutzen wir viele Begriffe wie selbstverständlich. Allerdings ist bei genauerer Betrachtung oft gar nicht so klar, was damit eigentlich gemeint ist.
- 2 Beispielsweise gelten in vielen Bereichen, vor allem in der Physik, »Naturgesetze«: Im Prinzip bestimmen sie zu jeder Zeit die Abläufe im Kosmos, auf der Erde ebenso wie überall sonst.
- 3 In der realen Welt treffen die Regeln nur unter vereinfachten Annahmen zu. Wie ist das mit dem universellen Anspruch vereinbar? Zahlreiche Philosophen haben sich an Erklärungen versucht.

den Luftwiderstand wegdenkt, fallen alle Körper gleich schnell.

Doch wie passen das Buch der Natur und die beobachtbare Natur zusammen? Die Historikerin Carla Rita Palmerino rekonstruiert Galileis Sichtweise so: Auch die kleinen Unebenheiten der Realität lassen sich mathematisch exakt fassen – bloß wird es irgendwann zu kompliziert für den begrenzten Verstand der Menschen. Die Forscher müssen daher die Natur vereinfachen, um sie mathematisch zu beschreiben. Beim ersten newtonschen Gesetz müssen sie sich die vielen schwachen, für das aktuell zu lösende Problem unwichtigen Einflüsse wegdenken. Unter diesen idealisierten Bedingungen gibt es auch Gegenstände, auf die keine Kraft einwirkt.

Die Philosophin Nancy Cartwright hat den Einwand gegen Naturgesetze in den 1980er Jahren ausgearbeitet: Physikalische Gesetze lassen sich ihrer Ansicht nach grundsätzlich nicht uneingeschränkt anwenden, sondern immer nur unter bestimmten Voraussetzungen. Man sagt, sie gelten *ceteris paribus* – solange die Umstände gleich bleiben. Das erste newtonsche Gesetz trägt die Bedingung schon in sich: Es gilt nur, wenn ein Körper keinen Kräften unterliegt.

Cartwright argumentiert noch weiter und wählt dazu als Beispiel das Brechungsgesetz. Es beschreibt, wie sich Wellen beim Übergang in ein dichteres oder weniger dichtes Medium ausbreiten. Es bezieht sich auf isotrope Medien, die in alle räumlichen Richtungen die gleichen Eigenschaften haben. Die meisten sind jedoch zumindest ein bisschen anisotrop und teilen das einfallende Licht in zwei Strahlen auf. Die Philosophin zieht daraus den Schluss: Naturgesetze sind nicht nur eingeschränkt, weil sie nur unter speziellen Bedingungen gelten. Sie sind es darüber hinaus, weil diese nur selten erfüllt sind.

Das Universum sei nicht ordentlich konstruiert, schreibt Cartwright, sondern eine unüberschaubare Fülle von Dingen, die geschehen und aufeinander einwirken: »Die Natur

neigt zur wilden Übertreibung, die unser Denken nicht ganz einfangen kann.« Trotzdem könne man ein Gesetz wie das der Brechung nutzen, um optische Phänomene zu erklären. Man dürfe nur nicht davon ausgehen, dass es unter allen Umständen gelte.

Warum wollen Wissenschaftler überhaupt so hoch hinaus und universelle Naturgesetze finden? Könnte man nicht auch ein tiefes, befriedigendes Verständnis der physikalischen Vorgänge finden, ohne zu glauben, in Gottes Regelwerk geschaut zu haben? Doch gerade dieser ursprünglich religiöse Gedanke scheint in der Diskussion mitzuschwingen, sie sogar zu beflügeln: dass die Naturgesetze die »Vorschriften Gottes für das Verhalten der Natur« darstellen, wie es der Philosoph Ronald Giere ausdrückt.

Giere führt den Begriff des Naturgesetzes mindestens auf das 17. Jahrhundert zurück, auf René Descartes und Isaac Newton. Newton hatte zum Beispiel keinen Beleg dafür, dass seine Gleichungen auch außerhalb des Sonnensystems richtig sind. Die Astronomie war noch nicht so weit; die Fixsterne wirkten damals unbeweglich. Doch warum sollte es der Schöpfer hier so und dort anders eingerichtet haben? »Newton brauchte seinen Gott«, kommentiert Giere. Das religiöse Denken hielt sich seiner Ansicht nach bis ins 19. Jahrhundert: »Erst nachdem sich Darwins Revolution durch das intellektuelle Leben Großbritanniens gearbeitet hatte, wurden die Naturgesetze endgültig von Gottes Willen getrennt.« Die Idee kehrte in säkularisierter Form zurück. Gesucht werden heute Naturgesetze, die etwas beschreiben, das notwendigerweise und nicht bloß zufällig geschieht.

Viele Philosophen suchen neue Konzepte – sie vermuten tiefere Wahrheiten

Aus Sicht von Giere und einigen seiner Kollegen kommt man in der Wissenschaft aber auch ohne das aus. In der Analyse Gieres arbeiten Physiker stattdessen mit Modellen, die einen kleinen Ausschnitt der Realität in einer idealisierten Form erfassen. Innerhalb dieser Modelle kann man die Gleichungen aus den vermeintlichen Naturgesetzen mit höchster Präzision anwenden.

Die Mehrheit der Philosophen findet solche Ansätze zu dürftig. Wenn die Modelle zur physikalischen Welt passen, dann beschreiben und erklären sie doch wichtige Aspekte dieser Realität, wenden Gieres Kritiker ein. Und das ist nur denkbar, wenn es die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung aus den Modellen auch in der physikalischen Welt gibt. Man wird also das Gefühl nicht los, dass es tiefere Wahrheiten zu entdecken gibt, als Giere es zulässt.

Gieres Kritiker arbeiten daher an neuen Konzeptionen von Naturgesetzen, die damit zurechtkommen, dass sie in der Realität nicht exakt gelten. Einen solchen Ansatz vertritt Andreas Hüttemann von der Universität zu Köln: Ihm zufolge beschreiben Naturgesetze die Neigung von Körpern, sich unter bestimmten Bedingungen in einer gewissen Art und Weise zu verhalten. Damit wären sie universal gültig, aber die Neigungen kämen nicht immer zum Vorschein. Mit der Lösung sind viele Philosophen nicht wirklich zufrieden, denn sie lässt offen, warum die Körper ihre Neigungen ausleben müssen. Diese Notwendigkeit ist ihnen bis heute ein Rätsel. »Eine restlos überzeugende Theorie der Naturgesetze gibt es

Naturgesetze in der Psychologie?

Physiker haben es mit einem beneidenswert überschaubaren Satz an Objekten zu tun: den Elementarteilchen. Ihre Formeln sind oft elegant – man denke nur an die vier maxwellschen Gleichungen zum Elektromagnetismus. Sozialwissenschaftler wie Psychologen, Soziologen, Politologen, Ethnologen und Ökonomen hingegen sehen sich einer bunten Vielfalt an Menschen ausgesetzt. Ihre Untersuchungsobjekte unterscheiden sich hinsichtlich Temperament, Intelligenz, einer Menge politischer und religiöser Überzeugungen sowie Lebenserfahrungen.

Man könnte noch die Medizin hinzunehmen und von Humanwissenschaften sprechen, weil der menschliche Körper ebenfalls nicht einheitlich arbeitet. Ein Medikament kann bei Patient A wirken und bei Patient B nicht, etwa weil dessen genetische Ausstattung dazu führt, dass der Wirkstoff zu schnell abgebaut wird oder er regelmäßig vergisst, seine Tabletten einzunehmen.

Solche Gründe sind nicht alle in Form von medizinischen Gesetzen beschreibbar.

Selbst wenn man Menschen im Labor untersucht, bekommt man die individuellen Differenzen methodisch nicht immer in den Griff. Im Gegenteil, dort verhalten sich Probanden anders. Sie neigen zum Beispiel dazu, den Anweisungen des Versuchsleiters zu folgen, weil sie ihm das Experiment nicht verderben wollen. Das ist zwar für sich genommen ein interessanter Befund, doch es verfälscht die Studien, in denen man herausfinden will, was die Versuchsteilnehmer wirklich denken.

Die Gesetzmäßigkeiten, auf die Humanwissenschaftler stoßen, sind daher in besonderem Maß von den Umständen abhängig. So besagt in der Psychologie der Bestätigungsfehler (im Englischen: confirmation bias), dass Menschen Informationen tendenziell ignorieren, die nicht zu ihren Überzeugungen passen. Wenn sie Zeitung lesen, merken sie

sich vorzugsweise nur das, was ihre Ansichten bestätigt oder sich in diesem Sinn interpretieren lässt. Doch zuweilen lassen sie sich auch gern überraschen und für neue Argumente gewinnen. Es kommt darauf an, ob sie der Nachrichtenquelle vertrauen und in welcher Stimmung sie sind. Noch schwieriger dürfte es sein, die psychologischen Gesetze so zu formulieren, dass man sie mit den zu Grunde liegenden Vorgängen im Gehirn verknüpfen kann.

Trotzdem verstehen wir Regelmäßigkeiten, denn wir können uns in andere Menschen hineindenken und -fühlen. Die Sozialwissenschaftler bauen auf diesem Alltagsverständnis auf – und erben damit zugleich einen Nachteil: Ihre Begriffe sind von vornherein mit vielen Nuancen aufgeladen und nicht so scharf wie in der Physik. Das erschwert die Formulierung von Naturgesetzen weiter, macht die Fachgebiete jedoch besonders spannend.

nicht«, schreibt daher Hüttemann. Vielleicht fehlt die Anregung durch die Physik: Wenn klar wäre, wie es hier weitergeht, wenn also neue Naturgesetze entdeckt würden, könnten die Philosophen daraus weitere Ideen entwickeln. Aber derzeit stockt der Fortschritt. Ob es noch Teilchen gibt, die nicht im Standardmodell der Materie vorkommen, ist zum Beispiel unklar. Und zwischen der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie klafft eine bisher unüberwindbare Lücke.

Rätselhaft sind nicht zuletzt die Konstanten in den Naturgesetzen. Sie sind derart stabil, dass seit Mai 2019 alle so genannten SI-Einheiten – Sekunde, Meter, Gramm, Kelvin und so weiter – durch die Naturkonstanten definiert werden. Zudem scheinen sie aufeinander abgestimmt zu sein. Sie wirken, als seien sie passend gewählt, um Leben im Kosmos zu ermöglichen. Wäre die Gravitationskonstante zum Beispiel kleiner, als sie tatsächlich ist, hätten sich keine Sterne und Galaxien bilden können, oder die Sterne wären zumindest nicht in Supernovae explodiert und hätten nicht all die Elemente ins Universum geschleudert, aus denen später Planeten entstanden.

Man kann mit den Schultern zucken und sagen, dass wir uns darüber nur Gedanken machen können, weil die Naturkonstanten zufällig so sind, wie sie sind. Doch mit der

Antwort wollen sich viele nicht zufriedengeben. Sie vermuten, dass es eine tiefere Wahrheit zu entdecken gibt. ◀

QUELLEN

Cartwright, N.: How the laws of physics lie. Oxford University Press, 1983

Giere, R.: The skeptical perspective: Science without laws of nature. In: Weinert, F. (Hg.): Laws of nature. Essays on the philosophical, scientific and historical dimensions. de Gruyter, 1995

Hüttemann, A.: Naturgesetze. In: Bartels, A., Stöckler, M. (Hg.): Wissenschaftstheorie. Ein Studienbuch. Mentis, 2007

Palmerino, C. R.: Reading the book of nature: The ontological and epistemological underpinnings of Galileo's mathematical realism. In: Gorham, G. et al. (Hg.): The language of nature: Reassessing the mathematization of natural philosophy in the seventeenth century. University of Minnesota Press, 2016

WEBLINK

<https://plato.stanford.edu>

Das frei zugängliche Onlinelexikon »Stanford Encyclopedia of Philosophy« gibt zu den Themen »laws of nature«, »ceteris paribus laws« und »fine-tuning« einen ausführlichen Überblick (auf Englisch).

REZENSIONEN

ÖKOLOGIE MEERESSCHÜTZER IN SZENE

Dieser bildgewaltige Band stellt Projekte von Aktivisten und Forschern vor, die sich für den Schutz der Meere einsetzen.

► Es war einmal – so fangen meist Märchen an –, da fand der Abenteuer und Fotograf York Hovest einen Klumpen Ambra am Strand. Der wachsähnliche, graue Stoff stammt aus dem Verdauungstrakt von Pottwalen; die Tiere scheiden ihn mitunter aus, nachdem er jahrelang in ihren Innereien verweilt. Dieser märchenhafte Fund lieferte Hovest das Startkapital dafür, dieses Buch zu schreiben. Denn Ambra ist ein Rohstoff für die teuersten Parfüme der Welt – halb so wertvoll wie Gold. Mit dem Geld konnte der Fotograf um die ganze Welt reisen, um vor Ort zu recherchieren, und hochwertige Unterwasserkameras sowie Drohnen für Luftaufnahmen anschaffen.

Herausgekommen ist ein großformatiger, bildgewaltiger Band, der allerdings nicht nur farbenprächtige und traumhaft schöne Meereswelten zeigt, sondern auch Inseln, die im Müll ersticken, oder sterbende

Korallenriffe. Der Fotograf hat diverse Aktivisten und Wissenschaftler besucht, die sich für den Schutz der Ozeane einsetzen. Sechs ihrer Projekte stellt er vor, die Hoffnung machen. Für den Autor sind diese Menschen »Helden der Meere«.

Hovests erste Reise führte nach Tansania. Hier, wo die Traumstrände der nahe gelegenen Insel Sansibar viele Touristen anlocken, sammeln Einheimische Muscheln aus den küstennahen Gewässern, um sie zu verkaufen. Doch wie wirkt sich das auf die Natur aus? Zwei Biologinnen des Leibniz-Zentrums für Marine Tropenforschung untersuchen das. Sie vergleichen die Ökosysteme in den Sammelgebieten mit denen eines nahe gelegenen Naturschutzgebiets. Noch sind ihre Studien nicht abgeschlossen, aber sie wollen auf Grundlage ihrer Ergebnisse gemeinsam mit den Einheimischen nach Lösungen suchen.

Der Autor berichtet noch von fünf weitere-

ren Hoffnung machenden Projekten. So versuchen Aktivisten, an der Westküste Thailands Korallen anzusiedeln. Andere bekämpfen mit einem sparkassenähnlichen Geschäftsmodell den Plastikmüll auf Haiti. Eine weitere Organisation will die marinen Ökosysteme vor Mexikos Küste schützen, indem sie den Tourismus und die Fischerei mit einbezieht. Hovest stellt zudem die Aktivisten der internationalen Meeresschutzorganisation »Sea Shepherd« vor, die er auf eine Kontrollfahrt begleitete, welche – in Zusammenarbeit mit dem afrikanischen Staat



ALEXANDRA POTTER GIMENO: AUS HOVEST, Y.: HELDEN DER MEERE MIT FOTO. GEN. DES TENEKUS VERLAGS

York Hovest
**HELDEN DER
MEERE**

Unterwegs mit
den Hütern eines
einzigartigen
Lebensraums
teNeues, Kempen
2019

224 S., € 50,-



Gabun – der Überwachung der Hochseefischerei diene.

Unter Wasser, auf See oder auf Inseln: Die atemberaubend schönen – und manchmal auch trostlosen – großformatigen Naturaufnahmen dieses Buchs ziehen die Betrachter in den Bann. Doch Hovest weiß nicht nur mit farbtintensiven und abwechslungsreichen Fotos zu faszinieren, sondern ebenso durch seine emotionalen Schilderungen. Als er einmal mit »Sea Shepherd« unterwegs war und sie einem Fischereischiff begegnete, tauchte er ganz nah vor das riesige Fangnetz. Seine erschütternden Eindrücke von dort beschreibt er sehr authentisch, wenn er wiedergibt, wie die tausenden Tunfische im Netz umherrsasen, zappeln und gemeinsam mit ebenfalls gefangenen Hammerhaien panisch ein Schlupfloch suchen, um zu entkommen. Eben jene Hammerhaie sah der Autor später wieder, als sie als Beifang tot ins Meer zurückgeworfen wurden.

Solche traurigen Momente wechseln sich im Buch ab mit freudigen, wenn der Autor beispielsweise erzählt, wie er einen Pottwal nahekam und dieser ihm fast ins Auge schaute oder wie er sich freute, als Teufelsrochen mehr als zwei Meter hoch aus dem Wasser sprangen. Ein rätselhaftes

Verhalten, das bis heute nicht restlos verstanden ist.

Hovest bringt in seinem Band viele Erklärungen und Fakten zu Korallensterben, Überfischung und Meeresökologie unter. Alles in allem ist ihm ein Werk gelungen, das einem nicht nur nahegeht, sondern auch aufschlussreiche Informationen vermittelt. Wer nach der Lektüre noch Lust auf weitere »Heldengeschichten« hat: York erstellt gerade eine Datenbank namens »Heroes of the Sea« (www.heroesofthesea.org), in der sich solche finden.

Die Rezensentin Katja Engel ist promovierte Ingenieurin der Werkstoffwissenschaften und Wissenschaftsjournalistin.

MATHEMATIK TÜCKEN DER STATISTIK

Eine niederländische Journalistin verdeutlicht anhand zahlreicher Beispiele, dass man statistische Angaben grundsätzlich kritisch bewerten sollte.

► Liest man den Titel dieses Buchs zum ersten Mal, kann es leicht passieren, dass man sein ergänzendes Anhängsel »mit diesem Titel« übersieht. Er soll vermutlich die Aufmerk-

samkeit der Konsumenten erregen. Zugleich irritiert er aber, da vielen nicht auf Anhieb klar sein dürfte, wie er gemeint ist.

Die Autorin Sanne Blauw hat Ökonometrie studiert, über den Zusammenhang von Ungleichheit, Vertrauen und Glück promoviert und arbeitet seither als Journalistin. Für die niederländische Nachrichten-Website »De Correspondent« verfasst sie regelmäßig Beiträge über den Einfluss, den Zahlen auf unser Leben haben. In ihrem Buch möchte sie die Leser vor einer allzu großen Datengläubigkeit warnen und tut das in sechs Kapiteln nebst Vor- und Nachwort, Quellenachweisen und Lesetipps mit überwiegend englischsprachigen und niederländischen Publikationen.

Eingangs schildert Blauw, wie, beginnend mit den Tontafeln der Babylonier, das Erheben statistischer Daten über die Jahrtausende hinweg zunehmend an Bedeutung gewann und heute unser ganzes Leben prägt. Auch kommt sie auf die britische Krankenschwester und Statistikerin Florence Nightingale (1820–1910) zu sprechen, die während des Krimkriegs (1853–1856) mit Hilfe selbst erstellter Grafiken die britischen Militärbehörden dazu bewegte, die hygienischen Verhältnisse in den Lazaretten zu

Die internationale Organisation »Sea Shepherd« setzt sich für den Schutz der Meere ein. Dafür nutzen die Aktivisten das ehemalige Walfangschiff »Bob Barker« – beispielsweise, um Gewässer zu überwachen und illegale Fischerei zu bekämpfen.



verbessern und so die Sterberaten zu senken. Nach diesen historischen Vorbemerkungen stößt die Autorin zum Kern ihres Anliegens vor und verdeutlicht anhand zahlreicher Beispiele, dass man statistische Angaben grundsätzlich kritisch bewerten sollte. Welche Fragen dabei zu stellen sind, gibt sie ihren Lesern mit auf den Weg:

- ▶ Welche Genauigkeit haben die Daten? Handelt es sich vielleicht nur um einen Mittelwert? Wie groß ist die Streuung, wie groß war der Stichprobenumfang?



- ▶ Welche Institution hat eine statistische Untersuchung in Auftrag gegeben und mit welcher Absicht?
- ▶ Lassen sich aus den Ergebnissen der jeweiligen Erhebung tatsächlich die angegebenen Schlüsse ziehen? Wurde eventuell Kausalität mit (zufälliger) Korrelation verwechselt?
- ▶ Erfassen die angegebenen Zahlen, beispielsweise der IQ oder das BIP, tatsächlich das, was gemessen werden soll?
- ▶ Wie zuverlässig sind Bewertungen und Rangskalen, etwa der Kreditwürdigkeit eines Bankkunden oder der »glücklichsten Nationen«?

Das eingängig geschriebene Buch lässt sich flüssig lesen. Mit großem Fleiß hat die Autorin viele unterhaltsame Beispiele zusammengetragen, die überwiegend aus englischsprachigen Veröffentlichungen und niederländischen Pressebeiträgen stammen. Unter anderem berichtet sie darüber, dass es bei der niederländischen Polizei so genannte Strafzetteltage gibt, die zum Ziel haben, über die Zahl der verteilten Strafzettel die Einsatzbereitschaft der einzelnen Polizisten

zu messen. Ähnliche Beispiele hätten sich leicht ebenso in deutschsprachigen Medien finden lassen, die Herausgeber beließen es jedoch im Wesentlichen bei der Übersetzung des niederländischen Originals.

Es sind bereits diverse Bücher erschienen, die sich mit typischen Interpretationsfehlern statistischer Daten oder Manipulationsversuchen in scheinbar objektiven Untersuchungen befassen; aber auch Leser mit entsprechenden Vorkenntnissen werden die eine oder andere neue Information aus dem Buch mitnehmen können. In seinen verschiedenen Kapiteln behandelt es ausgewählte Aspekte wie die Messung der menschlichen Intelligenz, die Zufälligkeit von Stichproben, Manipulationsversuche durch angeblich nachgewiesene Kausalität oder Big-Data-Bewertungssysteme. Gleichwohl streut die Autorin immer wieder Beispiele ein, die nicht unbedingt zum jeweiligen Kapitelthema passen, oder wiederholt bereits Geschriebenes mit anderen Worten. Das mindert allerdings nicht den Unterhaltungswert des Buchs.

Im Nachwort meint die Autorin, man könne dank der gewachsenen Kritikfähigkeit der Bürger und der vielen statistikkritischen Veröffentlichungen in den Medien durchaus optimistisch in die Zukunft schauen. Am Ende ihres Bands präsentiert sie eine Checkliste »Was man tun sollte, wenn man auf eine Zahl trifft« mit sechs Prüfpunkten: Wer legt die Zahl vor? Was empfinde ich angesichts der Zahl? Wie wurde standardisiert? Wie wurden die Daten erhoben? Wie wurden die Daten analysiert? Wie werden die Fragen präsentiert?

Blauw schließt mit den Worten: »Wir Menschen haben die Zahlen erfunden. Wir tragen also auch die Verantwortung dafür, wie sie verwendet werden.« Ihr Buch trägt zur Aufklärung über Datenmanipulation bei und lässt sich allen Interessierten empfehlen.

Der Rezensent Heinz Klaus Strick ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.

LINGUISTIK WÄCHTER DER WORTE

Sprachpflege und Nationalismus sind ein traditionsreiches Gespänn, wie der Germanist Karl-Heinz Göttert belegt.

▶ Karl-Heinz Göttert gehört offenbar zu den Professoren, die im Ruhestand noch einmal richtig loslegen. Seit er sich 2009 von seinen Dienstverpflichtungen als Professor für Ältere Deutsche Literatur an der Universität Köln verabschiedete, hat er im Schnitt jedes Jahr ein Buch veröffentlicht – darunter eine Kulturgeschichte der Orgel. Sein Hauptanliegen freilich ist und bleibt die deutsche Sprache und ihre Geschichte.

Im Jahr 2013 befasste sich Göttert in »Abschied von Mutter Sprache« unter anderem mit der Frage, ob das Deutsche tatsächlich in Anglizismen unterzugehen drohe, und konnte Entwarnung geben (»Spektrum« Dezember 2013, S. 99). Sprachwandel durch Einflüsse anderer Sprachen, schrieb er, sei historisch eher die Regel als die Ausnahme; Anglizismen und ihre Verwender öffentlich an den Pranger zu stellen, sei erstens zum Scheitern verurteilt und zweitens albern (was er selbst viel subtiler ausdrückte). Das ging auch gegen den Verein Deutsche Sprache und den Preis, den dieser alljährlich verleiht, nämlich den »Sprachpanscher des Jahres«, der sich vor allem gegen den Gebrauch von Anglizismen richtet.

Götterts neuestes Buch kann man als Begleitstück zu »Abschied von Mutter Sprache« lesen. »Die Sprachreiner« stellt die Geschichte eines Vereins dar, der sich ebenfalls die Reinhaltung des Deutschen auf die Fahnen geschrieben hatte. Es handelte sich um den 1886 gegründeten Allgemeinen Deutschen Sprachverein, der sich – das ist aber nicht mehr Gegenstand des Buchs – nach dem Zweiten Weltkrieg als Gesellschaft für deutsche Sprache neu konstituierte und in dieser Eigenschaft bis heute etwa das »Wort des Jahres« kürt.

Von Anfang an, so die Grundthese des Autors, seien im Fahrwasser der Sprachpflege Nationalismus und Chauvinismus gesegelt. Zu Zeiten des Allgemeinen Deutschen Sprachvereins allerdings empfand man vor allem die Sprache des soeben besiegten Kriegsgegners als feindlichen Einfluss, nämlich das Französische. Regelmäßig den Kürzeren zogen gemäßigte Vereinsangehörige wie dessen erstes Ehrenmitglied, der Generalpostmeister Heinrich Stephan. Diesem war es vor allem darum gegangen, nach vollzogener Reichsgründung eine einheitliche und verständliche Terminologie für das nunmehr gesamtdeutsche Postwesen zu schaffen. Dazu gehörten Begriffe wie »eingeschrieben« für »rekommandiert« oder »Umschlag« für »Couvert«. Hermann Dunger wiederum, Gymnasialprofessor aus Dresden, hatte 1882 ein Wörterbuch zu »Verdeutschungen entbehrlicher Fremdwörter« vorgelegt – und damit mehr oder weniger deutlich eingeräumt, dass es auch unentbehrliche gibt. »Dörrleiche« für »Mumie« beispielsweise ging Dunger zu weit.



Den Ton im Verein gaben aber schon bald Eiferer wie Otto Sarrazin an, dessen langjähriger Vorsitzender. Sarrazin interessierte sich nicht dafür, ob ein Fremdwort gut eingeführt und allgemein verständlich, im internationalen Sprachgebrauch anschlussfähig oder unverzichtbares Element einer präzisen Fachterminologie war. Es ging ihm um Reinhaltung ohne Rücksicht auf Verluste. Was die akademische Sprachwissenschaft, die in den Reihen des Vereins nur schwach

vertreten war, dazu zu sagen hatte, war für den Verein nicht von Belang. In akademischen Kreisen wiederum befand man es oft nicht der Mühe wert, gegen den offenkundigen Dilettantismus der Sprachreinerer Stellung zu beziehen. Gegenwind kam eher von Seiten der Universitäten insgesamt sowie von Schriftstellern: Die »Erklärung der 41« warnte vor einer möglichen Verarmung der Sprache im entfesselten Ausputzfuhr. Zu den Unterzeichnern zählten Theodor Fontane und der Althistoriker Theodor Mommsen, dem für seine »Römische Geschichte« 1902 der Literaturnobelpreis verliehen wurde.

In der Zeit des Nationalsozialismus wendete sich das Blatt. Einerseits tat sich der nunmehr gleichgeschaltete Verein zunächst schwer damit, dass viele Nazi-Granden keineswegs ausgewiesene Fremdwortfeinde waren. Joseph Goebbels beispielsweise, Germanist mit Dokortitel, mokierte sich 1937 in einer Rede vor der Reichskulturkammer vielmehr über »künstlich erdachte Wortbildungen«, die »völlig am Wesen der Sprache« vorbeigingen. »Der Führer wünscht nicht derartige gewaltsame Eindeutschungen«, sah sich der Verein gezwungen zu drucken. Andererseits hatte man mit Rudolph Buttmann ein prominentes NSDAP-Mitglied als Vorsitzenden, und es kamen (wieder einmal) Überlegungen auf, der Sprache eine weltbildgestaltende Kraft zuzuschreiben. Das bot eine willkommene Rechtfertigung dafür, Wörter aus anderen Sprachen auszugrenzen, weil sie angeblich das genuin deutsche Denken und Fühlen zu kontaminieren drohten.

Dies und vieles mehr leuchtet Göttert bis in die dunkelsten Ecken aus. Natürlich kommt dabei einiges an unfreiwilliger Komik zum Vorschein. »Seidling« für den Kokon oder »auteln« für die Fortbewegung per Automobil beispielsweise. Man täte Göttert allerdings Unrecht, würde man sein Buch auf eine Ansammlung solcher Kuriositäten reduzieren. Es geht ihm nicht um wohlfeile Denunziation und billige Schenkelklopfer – sein Anliegen ist Aufklärung. Dabei gelingt es ihm einerseits, die eigene Haltung nicht

krampfhaft zu bemänteln, sie dem Leser andererseits aber nicht aufzudrängen. Es bleibt dem Publikum überlassen, Parallelen zur heutigen Zeit zu ziehen oder auch nicht. Göttert selbst belässt es bei Andeutungen im Epilog.

Wenn der Ruhestand aller Professoren derart gründlich recherchierte und hervorragend formulierte Bücher hervorbrächte, wäre es unbedingt angeraten, über eine Verkürzung ihrer Lebensarbeitszeit nachzudenken.

Die Rezensentin Vera Binder hat Sprachwissenschaft und Philologie in Tübingen studiert und ist Studienrätin im Hochschuldienst am Institut für Altertumswissenschaften der Universität Gießen.

WISSENSCHAFTS- GESCHICHTE DER ERSTE KOSMOLOGE

Im 6. Jahrhundert v. Chr. spekulierten griechische Philosophen erstmals über stoffliche, nicht-göttliche Ursachen des Weltgeschehens. Einer von ihnen war Anaximander von Milet.

► Schon die ältesten schriftlichen Zeugnisse aus Babylon, Assyrien und Ägypten besagten, verschiedene Götter hätten die Welt erschaffen, verursachten alle Naturvorgänge und beherrschten die Schicksale der Menschen. So wurde es dann über die Jahrtausende hinweg weitergegeben. Doch im 6. Jahrhundert v. Chr. versuchte sich eine kleine griechische Denkschule, die wir heute die ionischen Naturphilosophen nennen, an einer ganz anderen Erklärung. Ihre Ideen kennen wir zwar nur fragmentarisch und von griechischen und römischen Berichten aus zweiter oder dritter Hand. Falls sie aber richtig überliefert wurden, muten sie selbst aus heutiger Sicht absolut modern an: Was in der Welt vorgeht, so ihre Grundannahme, beruht nicht auf göttlicher Willkür, sondern auf stofflichen Umwandlungen durch

Wärme und Kälte, Verdichten und Verdünnen.

Als Vater dieser Naturphilosophie gilt Thales von Milet (Milet war eine antike Handelsstadt an der Westküste der heutigen Türkei). Von ihm ist der Satz überliefert, das Wasser sei der Ursprung von allem; durch Trocknen und Verfestigen sei daraus die Erde hervorgegangen. Sein Schüler Anaximander postulierte hingegen, die Ursubstanz sei das »apeiron«, griechisch für »das Unbestimmte, das Unendliche«. Daraus entwickelte Anaximander eine ganze Kosmologie mit teils verblüffenden Details. So nahm er für die Erde nicht mehr – wie in den ältesten Mythen – die Form einer flachen Scheibe an, die von Göttern oder einer mythischen Schildkröte getragen werde, sondern stellte sie sich als runden, vermutlich zylindrischen Körper vor, der frei im Raum schwebt. Auch hielt er das Leben nicht für göttlichen Ursprungs; vielmehr verfocht er die These, es habe sich von selbst im Ozean entwickelt und dann allmählich das Land erobert.



Darum sieht der Autor dieses Buchs Carlo Rovelli in Anaximander geradezu den Urvater der modernen Kosmologie. Nicht nur führte der antike Denker, wie schon zuvor sein Lehrer Thales, die unendliche Vielfalt der Phänomene auf natürliche Veränderungen einer Ursubstanz zurück. Erstmals setzte er auch voraus, dass Himmel und Erde denselben Regeln gehorchen – ein spekulativer Gedanke, den erst der englische Naturforscher Isaac Newton (1643–1727) gut zwei Jahrtausende später zur wissenschaftlichen Blüte bringen sollte.

Rovelli ist zwar kein Altertumswissenschaftler und schießt in seiner Begeisterung für die Modernität Anaximanders angesichts unsicherer Quellenlage wohl etwas übers Ziel hinaus. Dafür überzeugt er aber als prominenter Grundlagenphysiker und erfolgreicher Wissenschaftsautor. Zusammen mit Lee Smolin hat er die Theorie der Schleifenquantengravitation entwickelt, die in Konkurrenz zur Stringtheorie beansprucht, eine Grundfrage der heutigen Physik zu beantworten: Wie lassen sich Quantenmechanik und Relativitätstheorie zu einer einheitlichen Theorie namens Quantengravitation vereinen?

Im zweiten Teil seines Buchs befasst sich Rovelli eigentlich mit der Rolle der heutigen Naturforschung. Anaximander dient ihm dabei als historische Parallele. So wie dieser sich von archaischen Mythen zur Erklärung der Natur verabschiedet habe, setze sich die moderne Wissenschaft von autoritären Ideologien und populistischen Ideen ab. Der Autor betont: Wissenschaftliches Denken unterscheidet sich von Dogmen durch methodische Skepsis. Nichts gilt als unumstößlich ausgemacht, was allerdings nicht heißt, dass man empirisch begründete Resultate als bloße Meinung abtun darf. Denn experimentelle Messungen liefern objektiv gültige Daten.

Mit seinem Bezug auf die Anfänge des antiken Denkens steht der Theoretiker Rovelli – möglicherweise unbewusst – in einer ehrwürdigen Tradition mit den Begründern der Quantenmechanik. Schon Erwin Schrödinger erinnerte in seiner Schrift »Die Natur und die Griechen« 1956 an die ionischen Naturphilosophen, und Werner Karl Heisenberg zitierte deren Nachfolger Pythagoras als frühen Verfechter einer mathematischen Naturbeschreibung. In dieser Reihe macht Rovellis elegant geschriebenes und – bis auf ein verkocktes Shakespeare-Zitat auf Seite 121 – schön übersetztes Buch eine ausgezeichnete Figur.

Der Rezensent Michael Springer ist Physiker und Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

ZIELLOS IN DEN KONFLIKT WORAN MODERNE KRIEGE SCHEITERN

Ein Politikwissenschaftler analysiert bewaffnete Auseinandersetzungen diverser Epochen und beleuchtet ihre heutigen Mechanismen.

»Es ist schließlich das Ergebnis einer nüchternen Betrachtung, dass die große Mehrheit der Kriege der letzten Jahre ohne erkennbare Strategie, orientierungslos und improvisierend geführt wurde. Solche Kriege abzulehnen erfordert nur Vernunft, keine pazifistische Überzeugung.« Bis Jochen Hippler in seinem Buch zu diesem Schluss kommt, hat er auf knapp 300 Seiten eine luzide Analyse zahlreicher Kriege vorgelegt und dabei mit großer Kenntnis von Geschichte, Politik und Militär überzeugt. Der Autor ist habilitierter Politikwissenschaftler und derzeitiger Länderdirektor der Friedrich-Ebert-Stiftung in Pakistan.

Dem eigentlichen Gegenstand des Buchs, nämlich dem Krieg im 21. Jahrhundert, gehen etwa 200 Seiten voran, auf denen Hippler die Geschichte des Kriegs vom Anfang der Menschheit bis heute im Schnellverfahren behandelt. Kompetent befasst er sich dabei mit Sozialgeschichte, Psychologie, Organisation, Militärorganisation und der Theorie verschiedener Formen bewaffneter Konflikte. Der Autor will »Leserinnen und Leser vor allem mit Material versorgen, selbst ihre politischen wie ethischen Schlussfolgerungen zu ziehen«.

Hiplers Ausgangsthese ist das allgemein bekannte Diktum des preußischen Militärs Carl von Clausewitz (1780–1831), wonach Krieg die Fortsetzung der Politik mit anderen Mitteln sei. Clausewitz, heißt es in dem Buch, habe als Erster nachdrücklich den Primat der Politik festgeschrieben, der vorher so nicht gesehen worden sei. Er war »einer der wenigen Theoretiker, der den Krieg nicht auf seine technischen Aspekte reduzierte, sondern sich darum bemühte, ihn in seiner Komplexität zu analysieren«. Bereits er

habe schon davon gesprochen, dass Krieg ein »Chamäleon« sei, der immer wieder sein Gesicht ändere.

Aus dieser Perspektive untersucht Hippler äußerst nüchtern etliche bisherige Kriege von der Antike bis zur Gegenwart. Er zeigt die sich ändernden Formen, die Entwicklung der Waffen und ihren Einfluss auf die Kriegführung. Zugleich macht er augenfällig, wie sich Kriege im Zuge der Staatenbildung von Kabinettskriegen absolutistischer Herrscher hin zu zwischenstaatlichen Konflikten entwickelten. Noch heute bestimme



der Waffengang zwischen zwei Staaten vornehmlich unser Bild vom Krieg, obwohl diese Variante kaum je in Reinform existiert habe. Unter anderem nach der napoleonischen Staatenbildung hätten sich Kriege deutlich gewandelt: Waren Zivilisten vorher weitgehend unbeteiligt und in der Opferrolle, habe die Staatenbildung die Gesellschaften militarisiert – die Legitimation des Staats wurde nun zur Sache der ganzen Bevölkerung.

Über die Zeiten hinweg nahm die Reichweite der Waffen enorm zu, besonders stark ab dem 19. Jahrhundert mit der Industrialisierung. Krieg verlor den Charakter eines Kampfes Mann gegen Mann, wurde zum Kampf gegen einen fernen, oft anonymen Feind. Zugleich erreichte im 20. Jahrhundert die Feuerkraft eine Stärke, die ganze Städte und Regionen, potenziell sogar die Menschheit auslöschen kann. Heutige Hightech-Waffen funktionieren zielgenau über unvorstellbare Entfernungen und entkoppeln so den Kombattanten vom Kampfgeschehen: »Vom Kommando des Abschusses einer Hellfire-Rakete dieser Drohnen in

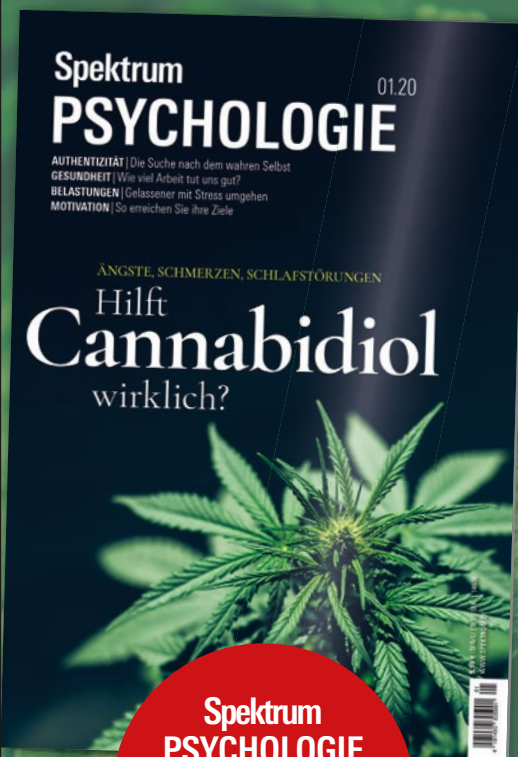
Nevada bis zum Einschlag (rund 12000 Kilometer entfernt an der afghanisch-pakistanischen Grenze, d. Red.) dauerte es etwa 1,7 Sekunden.«

Kriege der Gegenwart finden nur noch selten direkt zwischen Staaten statt. Häufig sind es Maßnahmen gegen lokale Unruhen und Aufstände, in die sich ausländische Mächte interessengeleitet einmischen, oft über Stellvertreter, vielfach als »humanitäre Interventionen« verschleiert oder, wie im Fall der deutschen Präsenz in Afghanistan, mit diffuser Öffentlichkeitsarbeit gerechtfertigt.

Hippler unterscheidet die unterschiedlichen Kriegstypen zwischenstaatlich-innerstaatlich; konventionell-unkonventionell; bilateral-multilateral; einfach, homogen-multipel, komposit; konstant staatlich-mutierend; subnational-national-international. Diese Kategorien treffen aber nur selten ausschließlich zu; gegenwärtige bewaffnete Konflikte sind immer hybride Mischformen. Es kommt laut Autor darauf an, jeden einzelnen Konflikt genauer zu analysieren, einschließlich der Vermischung von Kriegs- und Friedenszuständen.

Wie aus dem Buch hervorgeht, ist mittlerweile die paradoxe Situation eingetreten, dass Kriege nicht an mangelnder militärischer Schlagkraft scheitern, sondern an der Unfähigkeit der Politiker, klare Kriegsziele zu definieren. Hippler zitiert den ehemaligen US-General Anthony Zinni: »das Militär (ist) verdammt gut darin, Menschen zu töten und Dinge kaputt zu machen«, aber »extrem schlecht darin, die strategischen Probleme zu lösen«. Weil die Politik dies versäume, so der Autor, schleppten sich Konflikte wie die in Afghanistan, Irak oder Libyen endlos dahin, ohne dass eine Staatenbildung oder ein anderes klar benennbares Ergebnis erreicht werde.

Aus Hipplers Buch lernen die Leser(innen) viel über Krieg und Politik. Es ist klar, kompakt und sehr verständlich geschrieben. Der Autor analysiert nicht nur die Vergangenheit und Gegenwart, sondern arbeitet auch die Prognose heraus, dass die gegenwärtigen Nationalisierungstendenzen zwischenstaatliche Kriege künftig



**Spektrum
PSYCHOLOGIE**
Das Magazin
für Kopf, Herz
und Bauch

Spektrum PSYCHOLOGIE bringt Ihnen alle zwei Monate tiefere Einsicht in das menschliche Miteinander, mehr Orientierung in aktuellen gesellschaftlichen Fragen sowie positive Impulse für Ihr eigenes Leben:
Kompakt und informativ.

service@spektrum.de
Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum-psychologie.de



REZENSIONEN

wohl wieder wahrscheinlicher machen. Wenn überhaupt ein Manko an dem Werk erkennbar ist, so dieses, dass eine etwas weitergehende Analyse der Kriege im Nahen Osten wünschenswert wäre. Aber im Literaturverzeichnis finden sich reichlich Verweise auf entsprechende Arbeiten.

Der Rezensent Josef König ist Germanist und Philosoph, ehemaliger Leiter der Pressestelle der Ruhr-Universität Bochum und hat den Informationsdienst Wissenschaft mitbegründet.

DIGITALISIERUNG VORFAHRT FÜR DATEN?

Ein IT-Entwickler lotet die Zukunft des Personenverkehrs aus.

Die Automobilindustrie erlebt gerade die größte Transformation ihrer Geschichte. Die Zeit des Verbrennungsmotors ist zwar noch nicht vorbei, doch ihr Ende kündigt sich immer lauter an. So will Norwegen ab 2025 keine neuen Benziner oder Diesel mehr zulassen, Kommunen verhängen Fahrverbote oder verbannen Autos ganz aus den Städten, und die Ingenieure in den Entwicklungsabteilungen der Autobauer rätseln ebenso wie die Referenten im Verkehrsministerium, ob nun Brennstoffzellen oder Akkus die künftigen E-Mobile mit Energie versorgen werden.

Als gäbe es nicht Baustellen genug, treten auch noch neue Wettbewerber der Plattformökonomie wie Google oder Uber auf den Plan, die mit datengetriebenen Mobilitätskonzepten – darunter autonomen Fahrzeugen – den Markt und die Regulierungsbehörden vor unerwartete Herausforderungen stellen. Ganz zu schweigen von den Nachbeben des VW-Dieselskandals: Jene illegale Abschaltvorrichtung, die dank entsprechender Programmierung gezielt die Abgaswerte manipuliert, hat der Öffentlichkeit vor Augen geführt, dass Autos Computer auf Rädern sind. In einem durchschnittlichen Fahrzeug stecken 150 Millionen Zeilen Programmcode.

Der IT-Entwickler und Hochschulprofessor Timo Daum hat nun ein Buch

mit dem Titel »Das Auto im digitalen Kapitalismus« geschrieben. Die Digitalisierung, so die These des Autors, krepelt nicht nur Geschäftsmodelle um, sondern verändert die Funktionalität des PKWs insgesamt. »Das Auto wird zum IT-Produkt, seine Nutzung zum digitalen Service, und seine Käuferinnen und Käufer werden zu Nutzerinnen und Nutzern.« Sowohl beim autonomen Fahren als auch beim elektrischen Antrieb und insbesondere bei neuen Nutzungsmodellen seien »durchgehend Kernkompetenzen der IT gefragt«, konstatiert Daum.

Der Autor, der vor zwei Jahren sein viel beachtetes und preisgekröntes Werk »Das Kapital sind wir« vorgelegt hat, nimmt hinsichtlich des Datenkapitalismus nun also das »Subsystem Auto« unter die Lupe. Sein Buch ist ein Parforceritt durch alle möglichen Teilbereiche durchdigitalisierter Vehicle – vom autonomen Fahren über Carsharing bis hin zu Robotertaxis. Auf dieser Rundreise biegt der Autor jedoch in einige Ausfahrten ein, deren Sinn sich nicht recht erschließt. So schreibt er über den »Green New Deal« und autogerechte Städte, ohne



eine Verbindung zum Kernthema herzustellen. Worin der Zusammenhang zwischen grünem und digitalen Kapitalismus besteht, erfahren die Leser nicht.

Dabei gibt es ja durchaus Bezüge: So setzt die Datenproduktion beziehungsweise Datenverarbeitung jede Menge Kohlenstoffdioxid frei. Laut einer Studie der französischen Denkfabrik »The Shift Project« verursachen allein Streamingdienste 300 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr. Das ist etwa ein

Prozent aller globalen menschengemachten Emissionen. Daraus wäre die Frage abzuleiten, ob ein algorithmengesteuertes Flottenmanagement womöglich doch nicht so klimafreundlich ist, wie die Entwickler immer behaupten, und ob der elektrifizierte, datensammelnde Verkehr nicht eher Problem als Lösung ist. Dies jedoch erörtert Daum nur am Rand. Stattdessen verliert er sich in Details über verschiedene Aussagen von Managern und Politikern.

In die holprige Analyse mischen sich zuweilen inhaltliche Fehler. So schreibt Daum über »Eigentumsformen« von Daten, obgleich Daten nach herrschender Meinung von Juristen gar nicht eigentumsfähig sind. An manchen Stellen wirkt das Buch wie ein Aufguss vorheriger Werke. Sätze wie »Das Auto wird zum Teil eines Mobilitätsnetzwerks« finden sich als zentrale Aussage fast wortgleich in »Das Kapital sind wir«.

Interessant wird es dort, wo Daum auf datenökonomische Details und Datenhoheit zu sprechen kommt. In Barcelona etwa gibt es Kooperativen, in denen Daten als öffentliche Güter geteilt werden und Bürger über offene Schnittstellen darauf zugreifen können. Auch das Beispiel eines auf der Berliner Stadtautobahn geblitzten Teslas, der seine Position und Geschwindigkeit (209 Kilometer pro Stunde) brav an die Zentrale funkte, ist erhellend – und zeigt das mögliche Kontrollpotenzial des digitalen Verkehrs auf.

Daums Plädoyer für eine neue Verkehrsordnung, die den »Primat des Autos« in Frage stellt, und die darin enthaltene Forderung einer »kommunalen Datenhoheit« sind diskussionswürdig, aber etwas arg verkürzt. Hier hätte man gern mehr gelesen. Es wäre insgesamt von Vorteil gewesen, wenn der Autor den durchaus interessanten Zugang zum Thema – die Fokussierung auf das Auto im Datenkapitalismus – konsequenter verfolgt und sich nicht auf so vielen Nebenschauplätzen verloren hätte.

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

Ihre Vorteile als Abonnent

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

Spektrum LIVE-VERANSTALTUNG
Die Wissenschaft vom Whisky
Vortrag und Tasting
Östringen, 20. März 2020

IGORRI / GETTY IMAGES / ISTOCK

Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**

- | | |
|------------|---|
| 10.2. 2020 | Redaktionsbesuch Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg |
| 14.2. 2020 | Kuratorenführung durch die Sonderausstellung »Javagold« in den Reiss-Engelhorn-Museen, Mannheim |
| 9.3. 2020 | Leserexkursion zum Haus der Astronomie, Heidelberg |
| 8.5. 2020 | Leserexkursion zum Radioteleskop Effelsberg |

Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von **Partnern** zum **Vorteilspreis**

- | | |
|----------------|---|
| 21.2. 2020 | Leserexkursion zum ESO-Supernova-Besucherzentrum, Garching |
| 21.2. 2020 | Spektrum LIVE-Vortrag über »Schwarze Löcher« in Kooperation mit dem ESO-Supernova-Planetarium, Garching |
| 13.–15.3. 2020 | Symposium »Wo sitzt der Geist? Von Leib und Seele zur erweiterten Kognition«, Nürnberg |
| 20.3. 2020 | Spektrum LIVE-Veranstaltung »Die Wissenschaft vom Whisky«, Östringen |
| 3.4. 2020 | Spektrum LIVE-Veranstaltung »Schokolade: Kulinarische Phasen zwischen harter und weicher Materie«, Frankfurt |
| 14.4. 2020 | Spektrum LIVE-Veranstaltung »Die Wissenschaft vom Whisky«, Östringen |
| 24.4. 2020 | Spektrum Schreibwerkstatt, Heidelberg |
| 19.6. 2020 | Spektrum Schreibwerkstatt, Heidelberg |

Digitales Produkt zum kostenlosen Download und weitere Vorteile

Download des Monats im Februar: **Spektrum** Kompakt »Ganz Ohr«
Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Leserreisen

Islands faszinierende Geologie im August 2020 mit Mol Reisen

Vorteilspreis auf ausgewählte ornithologische Reisen bei birdingtours.de

travel-to-nature Reisen nach **Namibia**, **Peru** oder **Costa Rica** zum **Vorteilspreis**

Einkaufsgutschein für den **Spektrum** Shop bei Buchung der **Chile**-, der **Polarlicht**- oder der **Mexikoreise** von Wittmann Travel e. K

Vorteilspreis der Astronomie-Leserreise nach Nordfinland mit GLUR, bei der Beobachtung und Fotografie der Polarlichter sowie Vorträge über Astronomie im Vordergrund stehen

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

LESERBRIEFE

IRRITIERENDE VERALLGEMEINERUNG

Drei Wissenschaftler berichteten von Vorgängen in der Stratosphäre, bei denen Winde regelmäßig ihre Richtung wechseln. (»Richtungswechsel in großer Höhe«, »Spektrum« September 2019, S. 42)

Günter Warnecke, Berlin-Zehlendorf: Die redaktionellen Aufmachungstexte sind reichlich irritierend, weil dort nicht von vornherein deutlich gesagt wird, dass es sich hier zunächst nur um ein primär äquatoriales Phänomen handelt. Auch in der Ankündigung des Artikels auf S. 3 müsste es bereits heißen, dass die Autoren nicht »die starken Winde der Stratosphäre«, sondern deren quasibiennale Oszillation über dem Äquator erklären wollen. Im Übrigen erstreckt sich die Stratosphäre nur in den Tropen von 16 bis 50 Kilometer Höhe, in mittleren und hohen Breiten beginnt sie oft schon in 8 bis 10 Kilometer Höhe.

Im obersten Bereich der Stratosphäre »sammeln sich« auch nicht (S. 45 links) »die Treibhausgase wie Ozon«, die das kurzweilige UV-Licht abfangen. Das Ozonmaximum liegt bereits in der Mitte der Stratosphäre, bei etwa 25 Kilometer Höhe. Dass es darüber bis zur Mesopause immer wärmer wird, liegt allein daran, dass infolge der hohen UV-Absorptionsrate des Ozons schon die geringen Mengen in 50 Kilometer Höhe für das dortige Temperaturmaximum sorgen. Die übrigen Treibhausgase sind eher gut durchmischt und tragen zur hohen Mesopausentemperatur vergleichsweise wenig bei; ihre Bedeutung liegt vielmehr im infraroten Strahlungsbereich, wo wiederum das Ozon weniger beiträgt.

Im Kasten »Auf einen Blick« ist der erste Satz in seiner so allgemeinen Aussage schlicht falsch. Dass auf dem überwiegenden Teil des Globus in der Stratosphäre ein monsunaler, also halbjährlicher Windrichtungswechsel von überwiegend starkem Westwind in der jeweiligen Winterhemisphäre und schwachem Ostwind im jeweiligen Sommer stattfindet, ist nämlich schon seit 100 Jahren sowohl als Tatbestand als auch hinsichtlich seiner Ursachen bekannt, und zwar als Folge der Auskühlung der polaren Strato-

sphäre während der winterlichen Polarnacht und der Aufheizung der Ozonschicht im Sommerhalbjahr.

Wenn man dies und das im Artikel beschriebene tropische Phänomen klar auseinanderhält, dann folgt interessanterweise: Wir haben es hier offensichtlich mit zwei physikalisch gänzlich uneinheitlich angeregten, räumlich unterschiedlich verteilten dynamischen Schwingungssystemen mit zudem verschiedener Frequenz zu tun. Sie interferieren bekanntlich sowohl miteinander als auch mit weiteren quasiperiodischen atmosphärischen Untersystemen, wie zum Beispiel der El-Niño-/Walker-Zirkulation.

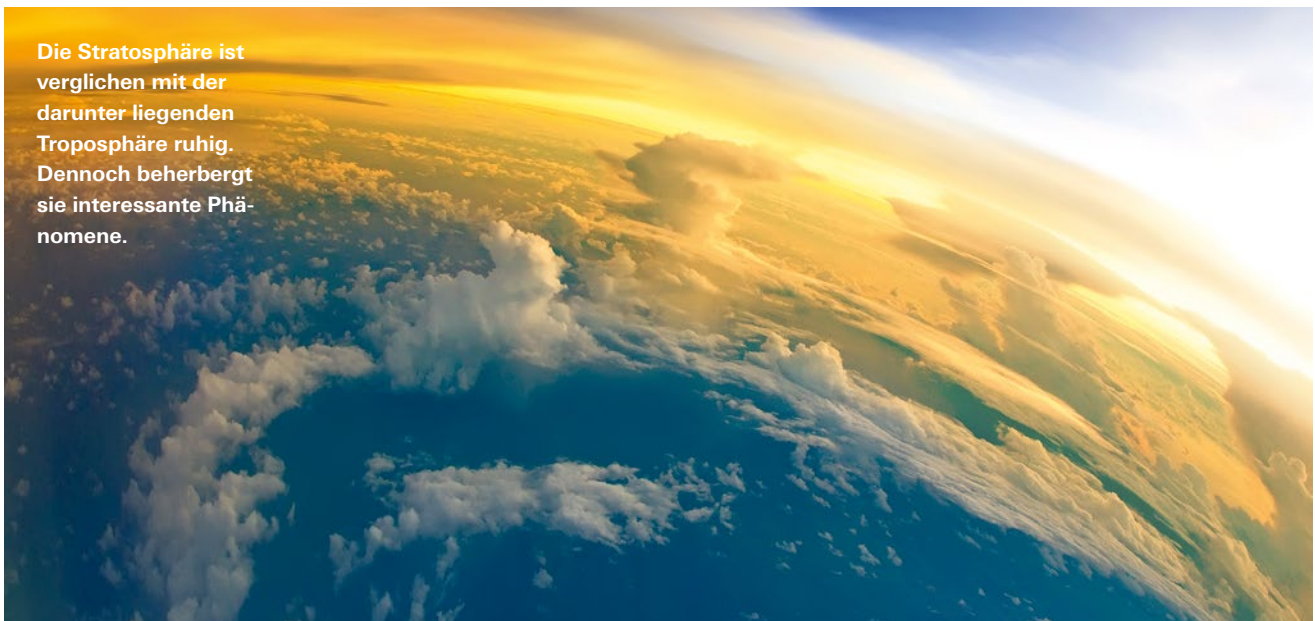
Wenn nun gezeigt werden kann, dass und wie sogar hochintensive mesoskalige troposphärische Phänomene wie tropische Wirbelstürme in höherskalige stratosphärische Vorgänge steuernd eingreifen, wäre das ein wichtiger Erkenntnisschritt, der allerdings den bekannten hohen Komplexitätsgrad unseres Wetter- und Klimasystems erneut vergrößerte. Dass sich aus dieser Erkenntnis schon neue Prognosemöglichkeiten für das Phänomen an sich ergeben sollen, klingt deshalb sehr mutig.

DORNRÖSCHEN UND DAS ANTHROPISCHE PRINZIP

Ein Gedankenexperiment sorgt für Streit unter Mathematikern: Dornröschen wird geweckt und je nach Ausgang eines vor ihr verborgenen Münzwurfs wieder in einen Schlaf versetzt, der ihre Erinnerung an den Vorgang löscht. Wie wird sie nach dem Aufwachen die Wahrscheinlichkeit der Ereignisse beurteilen? (»Dornröschen und die Wahrscheinlichkeitsrechnung«, Mathematische Unterhaltungen, »Spektrum« November 2019, S. 80)

Torsten Enßlin, Garching: Die Lösung des Dornröschenproblems, welche auch Christoph Pöppe in seinem Artikel favorisiert, lässt sich als Variante des in der Kosmologie verwendeten anthropischen Prinzips auffassen. Die Tatsache, dass wir auf einer bewohnbaren Erde leben, uns in einem lebensfreundlichen Universum wiederfinden oder

Die Stratosphäre ist
verglichen mit der
darunter liegenden
Troposphäre ruhig.
Dennoch beherbergt
sie interessante Phä-
nomene.



Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an leserbriefe@spektrum.de. Oder kommentieren Sie im Internet auf Spektrum.de direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

auch dass Dornröschen erwacht, enthält Information über die jeweiligen Umstände. Es ist etwas weniger wahrscheinlich, auf einem unwirtlichen Planeten, in einem lebensfeindlichen Universum oder auch nur unter einschläfernden Umständen aufzuwachen, so dass sich allein aus der Tatsache des Erwachens Rückschlüsse auf diese Umstände ziehen lassen. Dornröschen kann also wirklich bei ihrem Erwachen schließen, dass bei dem Münzwurf eher Zahl geworfen wurde als Kopf, da sie bei Zahl doppelt so oft aufgeweckt wird.

Hier die von Dornröschen vorgenommene Wahrscheinlichkeitsrechnung: Der Versuchsleiter gab die Information I = »Eine faire Münze wird für Sie verborgen geworfen. Bei Kopf werden Sie morgen, am Montag, geweckt und befragt. Bei Zahl geschieht dies an den nächsten beiden Tagen, wobei Ihre Erinnerung an die erste Erweckung und Befragung mittels Drogen noch am Montag gelöscht wird.« Bevor Dornröschen diese Information bekommen hat, hätte sie den verschiedenen Kombinationen von Münzergebnissen (K/Z=Kopf/Zahl) und Erweckungstagen (M/D=Montag/Dienstag) aus Symmetriegründen dieselbe Wahrscheinlichkeit zugeordnet: $P(K,M) = P(K,D) = P(Z,M) = P(Z,D) = 1/4$.

Die Information I schließt jedoch für das Erwachen die Kombination Kopf und Dienstag aus, ohne eine der anderen hervorzuheben. Daher ist $P(K,D|I) = 0$ und $P(K,M|I) = P(Z,M|I) = P(Z,D|I) = 1/3$, wie auch eine formale Rechnung zeigt: $P(K,D,I) = 0$, $P(K,M,I) = P(Z,M,I) = P(Z,D,I) = 1/4$. Daraus folgt $P(I) = 3/4$, $P(K,D|I) = P(K,D,I)/P(I) = 0$, $P(K,M|I) = P(K,M,I)/P(I) = (1/4)/(3/4) = 1/3$ und so weiter.

Beim Erwachen schließt daher Dornröschen, dass die Wahrscheinlichkeit für Kopf $P(K|I) = P(K,M|I) + P(K,D|I) = 1/3 + 0 = 1/3$ und für Zahl $P(Z|I) = P(Z,M|I) + P(Z,D|I) = 1/3 + 1/3 = 2/3$ ist. Hätte der Versuchsleiter ihr für Zahl statt zwei gar 1000 Erweckungen, Befragungen und Gedächtnislöschungen angekündigt (I'), wäre sie sich über Zahl als Ergebnis noch sicherer, $P(K|I') = 1/1001$ und $P(Z|I') = 1000/1001$.

Eine analoge Argumentation ist in der Kosmologie unter dem Namen anthropisches Prinzip bekannt: Zwar ist a priori die Wahrscheinlichkeit der Erschaffung eines Universums mit lebensfreundlichen Bedingungen bei willkürlichem Festlegen physikalischer Parameter verschwindend klein. Aber da unser Universum Leben beinhaltet, deutet diese Beobachtungstatsache sehr stark darauf hin, dass zumindest in unserem Teil des Universums die physikalischen Bedingungen lebensfreundlich ausgefallen sein sollten.

WO BLEIBT DIE BIOCHEMIE?

Wie Abnutzungsspuren auf fossilen Zähnen verraten könnten, was Frühmenschen gegessen haben, fasste Anthropologe Peter S. Ungar zusammen.

(»Die wahre Steinzeitdiät«, »Spektrum« Dezember 2019, S. 34)

Manfred Bühner, Freiburg i. Br.: Der Artikel ist sehr erhellend, außerdem verdienstvoll, weil er die neomodische »Steinzeitdiät« zurechtrückt. Allerdings bleiben beim Biochemiker gewisse Zweifel an manchen Interpretationen.

An einer Stelle wird erwähnt, dass der Enddarm der Berggorillas Bakterien enthält, die »beim Verdauen faserreicher Nahrung mithelfen«. Das führt im Enddarm aber nicht zum Erfolg, da hier keine Glukose ins Blut aufgenommen werden kann. Das ist schon fast alles (und wenig genug) über die Biochemie des Verdauens. Der Autor verlässt sich fast ausschließlich auf die Anatomie der Zähne.

Es wird erwähnt, dass die »Foodprints« nach wenigen Tagen wieder abgeschabt sind, also nur Aussagen über die Nahrung der letzten Tage erlauben. Bei Fossilien sieht man daher, wie auch der Autor bemerkt, nur die Ernährung in den letzten Tagen vor dem Tod.

Man muss bei Betrachtung der Ernährung nicht nur die Anatomie berücksichtigen, sondern auch die Biochemie der Verdauung – und bei jedem Nahrungsmittel, inwiefern es für Tiere und Menschen direkt verwertbare Nahrung enthält (Zucker, Stärke, Eiweiß, Fett) und wie groß der Anteil an unverdaulichen Substanzen ist (Zellulose, Pektine), die nur von gewissen Bakterien aufgeschlossen werden können. Beim Auftreten zellulosereicher Pflanzenkost muss vor allem die Ausstattung der betreffenden Tiere mit hilfreichen symbiotischen Bakterien überprüft werden. Bei heute lebenden Tieren sollten diese Fragen daher mit Zoologen geklärt werden, bei Fossilien ist man leider auf Vermutungen und Modelle angewiesen.

Da die Menschenaffen allgemein keine reinen Pflanzenfresser, sondern Gemischtfresser (Allesfresser) sind und keine symbiotischen Zellulose verdauenden Bakterien aufweisen, besteht besonders bei Fossilien von Homininen, bei denen Grasverzehr festgestellt wurde, der Verdacht, dass hier die Foodprints nicht die Gesamternährung beschreiben, sondern lediglich das Grasfressen aus Verzweiflung in den letzten Tagen vor dem Hungertod belegen. Sie verhungerten und bissen ins Gras.

ERRATUM

»Wege zum Wasserstoff«, »Spektrum« Januar 2020, S. 56

In der linken Spalte auf S. 59 fehlt bei der Angabe zu dem jährlichen Verbrauch von Wasserstoff in Deutschland ein »Milliarden«. Richtig sind 50 Milliarden Kubikmeter, wie an anderer Stelle im Text zuvor bereits korrekt genannt.

Ich und ich und ich und die Zeit

Wettlauf mit einem chronisch boshaften Widersacher.

Eine Kurzgeschichte von Uwe Schimunek

Nach 20 Minuten bis zu meiner Realzeit. Ich programmiere die Zeitkapsel und steige aus. Beim Start sieht die Kapsel beinahe aus wie ein normaler Aircar – sie verschwindet nur schneller und saust zurück in mein Labor.

Ich schlage den Kragen meiner Jacke hoch; durch die Fußgängerzone bläst der Wind, als wolle er die Stadt leer fegen. Aber das hält mich nicht auf. Womöglich bin ich der Letzte, der Frotzki stoppen kann.

Die App in meiner Smart-Brille meldet eine Time-Switch-Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent. Die Chancen stehen also halbe-halbe, dass ich eine Veränderung im Zeitverlauf verhindern kann. Die Anzeige daneben bestätigt, dass ich den Mindestabstand zu meinem T-Null-Ich habe. Deswegen machen mir die Überwachungskameras keine Sorgen.

An der Straßenecke leuchtet die Sub-Tube-Station. Vor dem Eingang schwirren ein paar Drohnen herum. Ich greife in die Manteltasche, finde eine Münze und lasse sie fallen. Beim Aufheben aktiviere ich die virtuelle Maske an meiner Smart-Brille. Irgendwann entdecken mich Frotzkis Algorithmen trotzdem. Doch vorher sitze ich längst in der Tube zum Campus.

Ich betrete die Rolltreppe und versuche, möglichst beiläufig an den Passanten vorbei nach unten zu eilen. Niemand beachtet mich. Die Augen zucken hinter den Gläsern der Brillen, folgen vermutlich Nachrichten- oder Unterhaltungsprogrammen. Auf der Plattform schwingen die Tubes aus den Röhren. Ich steige ein. In der Tube sitzt nur ein Mann. Ist das einer von Frotzkis Leuten?

»Bitte Platz nehmen, wir starten«, sagt eine Frauenstimme, bevor ich den Mann näher betrachten kann. Es zischt. Die Beschleunigung wirft mich in den Sessel. Nur einen Wimpernschlag später dreht sich der Sitz. Nun drückt mich das Abbremsen ins Polster.

»Universität«, sagt die Frauenstimme. Ich stehe auf. Der Mann ebenso. Anscheinend zeigt ihm seine Brille erst jetzt an, dass ich existiere. Er lässt mir den Vortritt. Gut, denn ich habe es eilig. Noch 15 Minuten bis zur Realzeit. Ich eile die Rolltreppe hinauf. Der Campus liegt menschenleer im Dämmerlicht. Im Laborgebäude sehe ich einen Schatten. Frotzki?

»Mobile Polizeieinheit. Routinekontrolle! Bitte weisen Sie Ihre T-Zeit aus!« Die Normstimme des Sicherheits-Bots kommt von hinten. Ich gehe weiter. So kann ich den Bot nicht abschütteln, aber Zeit und ein paar Meter gewinnen. Die Einheit schwebt an mir vorbei, deaktiviert meine Maske und versperrt mir den Weg. »Bitte weisen Sie Ihre T-Zeit aus!«, wiederholt der Bot. Ich weiche ihm aus und frage: »Meinen Sie mich?«

»Ja.« Der Blechkamerad schwebt wieder vor meine Füße und fährt die Greifer mit den Tasern aus. »Das ist eine Warnung vor den Folgen nichttödlicher Gewaltanwendung. Die Stromstöße sind schmerzhaft und können bei gesundheitlich beeinträchtigten Personen medizinische Behandlungen nötig machen.«

Ich bleibe stehen und krame in der Manteltasche nach der ID. Was nun? Wenn ich die Karte zeige, nimmt der Kerl mich fest. Vorher wird er mir einen Vortrag über die Gesetze zum zeitmanipulativen Reisen halten. Ich kenne die Ausführungen, denn ich habe sie verfasst. Also nicht die rechtssicheren Formulierungen, sondern die Inhalte. Schließlich hat mein Team die Zeitkapsel entwickelt.

Nachdem die Kollegen aus der Physik das Hawkingsium mit der negativen Masse entdeckt hatten, mussten wir Ingenieure damit nur noch eine Maschine bauen. In ihrem Inneren wird das Raumzeitgefüge so stark gekrümmt, dass man an einen Punkt in der Vergangenheit zurücktunneln kann. Damit nutzt man die Unschärfe der körnigen Quantengravitationseinheiten aus, sagen die Experten. Allzu weit zurück geht's leider nicht. Aber die eine oder andere Stunde ist schon drin.

Diese Details kennt der Sicherheits-Bot natürlich nicht, er ist eine Basisausführung für den Streifendienst. Er steht vor mir mit seinen Tasern und ahnt nichts vom Ärger mit der Zeit. Denn schon mit Reisen in die jüngste Vergangenheit lässt sich allerhand Unsinn anstellen.

Frotzki zum Beispiel hat mit der Zeitkapsel eine steile Karriere gemacht. Es ist ein offenes Geheimnis, dass er mehrere Mitglieder der flugs eingesetzten parlamentarischen Zeitreise-Kommission mit dem Doppelten-Mann-Trick übertölpelt hat.

Erst hat er politische Gegner zu heiklen Absprachen in Hinterzimmern überredet. Dann ist er genau dorthin zurückgereist, um ebendiese Deals mit der Kamera zu dokumentieren und seine Gegenüber zu erpressen. Am Ende hatte er genug Kommissionsmitglieder in der Hand und wurde zum Institutsleiter und Chefberater der neuen Aufsichtsbehörde ernannt. Seitdem kontrolliert er sich selbst.

Und mich. Ich musste die Regeln in seinem Auftrag formulieren: Mindestabstand zum eigenen T-Null-Ich halten, mit der Zeitkapsel stets wenige Sekunden nach der Startzeit zum Ausgangsort zurückkehren. Ausgerechnet Frotzki und seine Männer sollen das überwachen.

Deswegen habe ich das Time-Switchometer konstruiert. Das Gerät zeigt mir die Wahrscheinlichkeit von Zeitmanipulationen an – sowie den Ort und den Zeitpunkt, an dem sie ausgelöst wurden. Darum stehe ich jetzt hier. Den Daten

nach hat es jemand auf das Time-Switchometer abgesehen. Ich wette, es handelt sich um Frotzki. Nur mein Gerät kann ihn noch in Schach halten.

Der Bot ruht vor mir, einzig seine optischen Sensoren zeigen, dass er nicht in den Standby-Modus geschaltet hat. Der lässt mich wahrscheinlich bis morgen in meinen Taschen kramen. So viel Zeit habe ich aber nicht.

»Ich muss meine ID im Büro vergessen haben«, sage ich.

»In diesem Fall begleiten Sie mich bitte zwecks T-Zeit-Überprüfung auf die Dienststelle.«

»Das Büro ist gleich dort im Gebäude.«

»Die Vorschriften ordnen eine Überprüfung auf der Dienststelle an.«

Ich seufze. Der Bot vibriert. Zwischen seinen optischen Sensoren sprühen Funken. Es knistert und riecht nach verbranntem Plastik. Die Blechkiste kippt zu Boden; es scheppert, als würde eine Mülltonne umfallen.

Hinter dem Schrott-Bot tauche ich auf und sage: »Wow!« Ich sehe die Augen meines Ichs leuchten. Der Stromschocker in der Hand qualmt noch.

»Bist du mein T-Null?«, frage ich.

»Quatsch, T-Zwei.«

Also ist die Zeitkapsel rechtzeitig im Labor angekommen und mein T-Null-Ich ist kurz vor meiner kleinen Zeitreise noch einmal gestartet, denke ich. Umso besser. Zu dritt kommen wir mit Frotzki sicher klar. In meinem Display sinkt die Time-Switch-Wahrscheinlichkeit prompt auf 25 Prozent.

»Schnell!«, ruft mein anderes Ich. Es steckt den Schocker ein und sprintet los. Ich bin nicht besonders gut in Form. Nach ein paar Schritten fehlt mir die Luft. Zum Glück ist mein Büro im Erdgeschoss. Wir stürmen ins Labor.

Frotzki steht mit dem Rücken zu uns an der neuen Konsole. Ich sehe den faltenfreien Anzug, den Politiker und Manager als Uniform tragen. Frotzki scheint uns nicht zu bemerken. Seine Finger fliegen über die Befehlszeilen auf dem Touchdisplay meines Zeit-Switchometers. Wir müssen eingreifen. Er braucht allenfalls noch ein paar Sekunden, um die Software auf dem Gerät zu löschen.

Mein T-Zwei-Ich zieht den Elektroschocker aus der Tasche. Ich schaue ihn an und schüttle den Kopf. T-Zwei verdreht die Augen.

»Hey!«, rufe ich.

Frotzki dreht sich um und erstarrt. Sein Mund steht offen, er sagt aber nichts. Nur seine Augen gucken abwechselnd zu T-Zwei und mir. Für einen Moment surren nur die Lüfter der Computer im Labor. Mein T-Zwei findet zuerst Worte und ruft: »Finger weg!« Dazu winkt T-Zwei mit dem Schocker.

Frotzki tritt langsam von dem Gerät weg. Sein Gesicht sieht aus wie ein Fragezeichen. Er murmelt: »Wo kommt ihr eigentlich her? Ich hätte das Gerät gleich zerstört! Wieso konntet es euch warnen?«

»Ich habe eine Kopie als App laufen«, antworte ich und tippe auf meine Brille. »In die Synchro ist ein Fallback programmiert, das die Werte auch bei einer Manipulation des Switchometers variieren lässt.« Die Anzeige vermeldet immer noch eine Wahrscheinlichkeit von zwölf Prozent.

Hinter mir öffnet sich die Tür. Ich trete ein. Also mein T-Null-Ich, das eigentlich zu spät kommt, um Frotzki davon abzuhalten, das Switchometer zu sabotieren. Es schaut ziemlich verdattert. Kein Wunder, schließlich wird es mich und T-Zwei erst in ein paar Minuten auf den Weg schicken – nachdem Frotzki das Switchometer sabotiert hätte.

»Das Spiel ist noch nicht vorbei!«, ruft Frotzki trotzig.

»Ich habe auch eine Zeitkapsel und kenne den Doppelten-Mann-Trick. Wenn ich in ein paar Minuten nicht zurück in meinem Büro bin, startet mein T-Null erneut und macht dieses Teufelsding eben noch früher kaputt. Ich weiß, dass Sie mit der Zeitkapsel auch umgehen können, und bin darauf vorbereitet!«

Nicht provozieren lassen, denke ich.

Mein T-Null-Ich scheint mittlerweile die Lage verstanden zu haben und sagt: »Also! Wir haben es gehört. Sein T-Null muss im Büro bleiben und darf die Zeitmaschine nicht benutzen.« Mein T-Null zeigt auf Frotzki. »Dann verschwindet der da von allein.«

»Jo!«, ruft T-Zwei, zückt den Schocker und macht sich bereit zum Gehen. Wieso ist der so aggressiv? Steckt das in mir?

»Nicht du.« Mein T-Null guckt zu mir. Ich? Offenbar sehen alle meine fragende Miene, denn mein T-Null erklärt: »T-Zwei muss gleich in die Kapsel und die Zeitreise starten. Dann bin ich allein im Büro. Wie ursprünglich. Danach steige ich in die Kapsel. So sollte diese Aktion den geringstmöglichen Einfluss auf den Zeitverlauf haben. Und ab meinem Start gibt es wieder nur einen von uns«, sagt mein T-Null und zeigt auf mich. »Dann übernimmst du.«

»Aber ich bin doch als Zweites ...«, sagt T-Zwei und guckt verzweifelt den Schocker an.

»Aber vorher, denn für T-Eins bin ich später und weiter zurückgereist«, sagt mein T-Null.

»Dann hab ich nur die paar Minuten?«, fragt T-Zwei.

»Du bist ich!«, entgegnet T-Null.

Ich verstehe. Also wir. In der Anzeige sinkt die Wahrscheinlichkeit für einen Time-Switch auf vier Prozent – unser Plan scheint zu funktionieren.

»Na gut«, sagt T-Zwei und klingt resigniert. »Ich passe auf diesen Frotzki auf, bis er weg ist.« Er drückt mir den Elektroschocker in die Hand. »Denk dran, Frotzkis T-Null darf nicht aus seinem Büro raus ...«

»... bis die Time-Switch-Wahrscheinlichkeit bei null liegt«, ergänze ich.

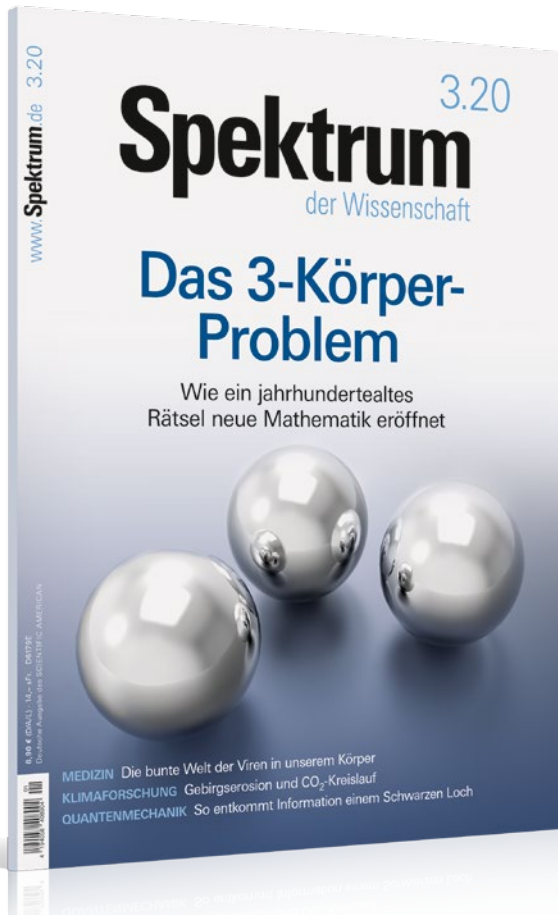
Auf dem Weg zur Tür stecke ich den Schocker in die Tasche. Ich kläre das mit Worten. Das kann ich viel besser. Oder? ◀

DER AUTOR

Uwe Schimunek lebt als Autor und Journalist in Leipzig. Er veröffentlicht Krimis, Kinderbücher sowie Kurz- und Sachtexte. Seine SF-Stories erschienen unter anderem in »Exodus«, verschiedenen Jahresanthologien und Büchern zu den Fantastikmessen Elstercon und ColoniaCon.

www.uwe-schimunek.de

VORSCHAU



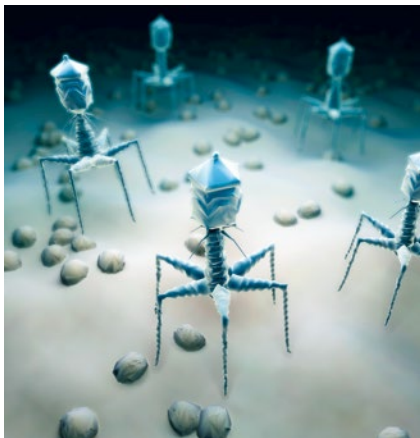
MATRESDINIA / GETTY IMAGES / ISTOCK BEARBEITUNG, SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DIE UNLÖSBARE AUFGABE

Obwohl Forscher seit Jahrhunderten wissen, dass es unmöglich ist, die Flugbahnen dreier sich gegenseitig anziehender Objekte zu berechnen, birgt das Drei-Körper-Problem einige Überraschungen. Indem sich Wissenschaftler auf einzelne Aspekte des Themas konzentrieren und Konzepte aus unterschiedlichen Disziplinen vereinen, machen sie faszinierende mathematische Entdeckungen.

DAS VIROBIOM

Unser Organismus enthält nicht nur mindestens ebenso viele bakterielle wie menschliche Zellen, sondern auch zahllose Viren, mit denen wir dauerhaft koexistieren. Die meisten von ihnen sind Bakteriophagen, die für eine Balance unseres Mikrobioms sorgen. Zudem beeinflussen sie Stoffwechsel sowie Wundheilung und lassen sich medizinisch nutzen, um bakterielle Infektionen zu bekämpfen.



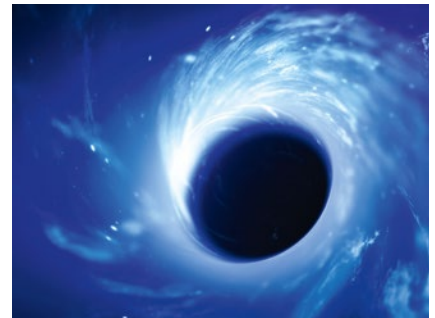
NOOPRABIT / GETTY IMAGES / ISTOCK



DANIEL PRUDEK / GETTY IMAGES / ISTOCK

DER ERD-THERMOSTAT

In einem faszinierenden Regelkreislauf halten sich die natürliche CO_2 -Produktion und dessen Verbrauch durch Gesteinsverwitterung die Balance. Modernste Isotopenmessungen verraten, was geschah, als dieses System in der Vergangenheit aus dem Gleichgewicht geriet.



PETRONICH12 / ISTOCK.ABBE.COM

FLUCHT AUS DEM SCHWARZEN LOCH

Was Schwarze Löcher einmal verschluckt haben, sollten sie eigentlich nie mehr frei geben. Dem widersprechen quantenmechanische Überlegungen. Seit Jahrzehnten gibt es diverse Szenarien, um das Dilemma zu lösen. Neue Beobachtungstechniken könnten offenbaren, was wirklich passiert.

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

Verpassen Sie keine Ausgabe!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!



ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,-), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



KOMBIABO:

Für nur € 6,-/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



Spektrum PLUS:

Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserekursionen und Redaktionsbesuche.

Jetzt bestellen!

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

www.spektrum.de/abo

Das wöchentliche digitale Wissenschaftsmagazin

App und PDF
als Kombipaket im Abo.
Jetzt bestellen!



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **50**
12.12.
2019

- > Läuse wuselten im Dino-Gefieder
- > Enceladus: Wie der Tigermond seine Streifen bekam
- > Vulkanausbruch löste 150 Meter hohe Tsunamis aus

TITELTHEMA: KOSMOLOGIE

Ist die Dunkle Energie ein gigantischer Irrtum?

Das Universum fliegt immer schneller auseinander. So lautet die gängige Theorie. Nun will ein Physiker aus Oxford diese widerlegt haben. Hätte er Recht, wären die Folgen gewaltig.

NATURKATASTROPHEN
Warum Vulkantourismus so gefährlich ist

GESUNDHEIT
Wie gesund oder schädlich ist Alkohol?

NITRAT & CO
Jenseits der Landwirtschaft

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.



www.spektrum.de/abonnieren