

Spektrum

der Wissenschaft

Flugsaurier

Wie die Giganten
die Lüfte eroberten



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

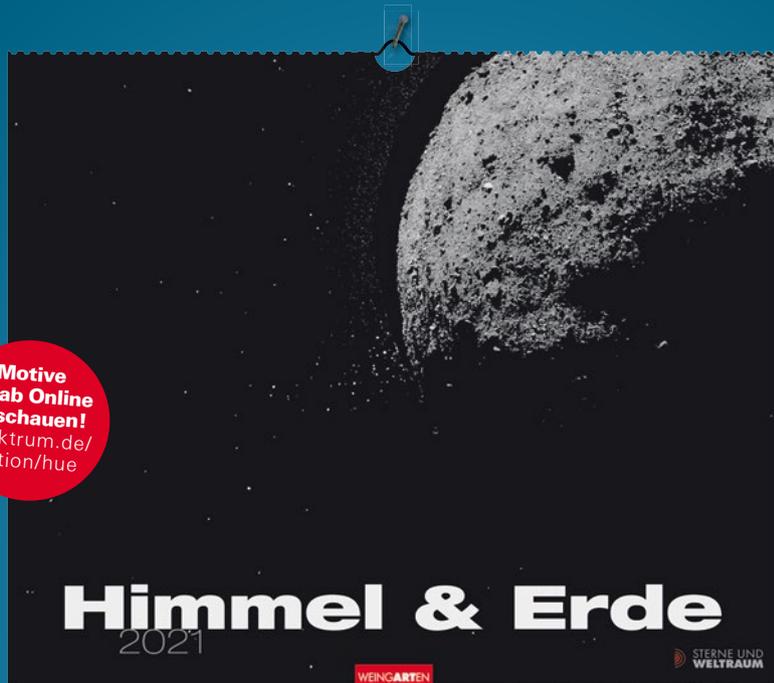
PLUTO Die rätselhafte Rückseite des Zwergplaneten

PANDEMIEN Was lehrt uns die Geschichte?

ARCHÄOLOGIE Die Megasiedlungen der Tripolje-Kultur



Neues aus unserem Shop!



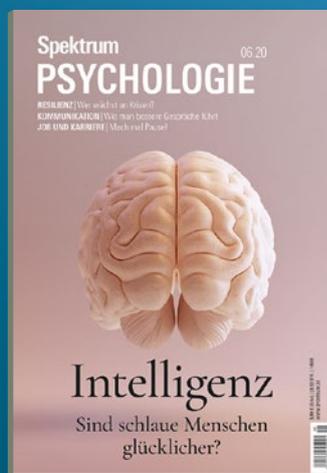
Motive
vorab Online
anschauen!
spektrum.de/
aktion/hue

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2021

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wie dem sichtbaren Licht oder dem Infrarotlicht. Die Aufnahmen zeigen die Aschefontäne eines Vulkanausbruchs, den Asteroiden Benu, den Superstern Eta Carinae, den jungen Stern PDS 70, den Riesenplaneten Jupiter und weitere Himmelsregionen und -objekte.

Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die besonderen Himmelsereignisse 2021 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern abgebildeten Objekte.

14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung;
Format: 55 x 46 cm; € 29,95 zzgl. Porto;
als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand



Zufriedenheit: Die zwei Gesichter der Intelligenz • Kommunikation: Wie man Gräben überwindet • Arbeit: Mach mal Pause! • Menschenkenntnis: Wie gut können wir Lügen erkennen? • Sozialverhalten: Warum Menschen Tyrannen folgen • € 5,90



Mississippi-Blase: Der erste große Crash • Picener: Kunststück einer globalen Welt • »Moby Dick«: Die letzte Fahrt der Essex • Unterwasserarchäologie: Schätze am Grund unserer Meere • Witwenverbrennung: Das Ende von Sati • € 5,90; ab 24. 10. 2020



Mengenlehre: Ordnung in den Unendlichkeiten • Neo-Geozentrismus: Was steht im Mittelpunkt? • Komplexe Theorien: Von Unendlichkeit zu Unendlichkeit • Topologie: Möbiusbänder trotz der Unendlichkeit • € 5,90

Alle
Sonderhefte
auch im
PDF-Format

Hier bestellen:

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

www.spektrum.de/shop



EDITORIAL HERRSCHER DES HIMMELS

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

► Wer länger meinem Newsletter auf »Spektrum.de« gefolgt ist, kennt mein liebstes Hobby: Ich bin ein Birdnerd, beobachte leidenschaftlich gerne Vögel, vertiefe mich stundenlang in Bestimmungsbücher und lese auch sonst mit Genuss Literatur über die Welt der Federtiere. Ob ich genauso begeistert wäre, wenn heute noch Pterosaurier am Himmel kreisten, lasse ich offen. Denn die Flugsaurier waren einfach gewaltig! Giganten wie *Quetzalcoatlus* oder *Hatzegopteryx* hätten stehend Giraffen ins Auge blicken können: Sie wogen bis zu 300 Kilogramm und erreichten Flügelspannweiten von mehr als zehn Metern. Gegen sie wirken selbst die größten heute lebenden Vögel wie Kondore oder Albatrosse wie Hänflinge.

Und dennoch konnten diese Monster fliegen, wie der Paläontologe Michael Habib in unserem Titelthema ab S. 12 eindrucksvoll beschreibt. Ihre lange evolutionäre Geschichte belegt, dass ihnen dies sogar ausgesprochen gut gelang. 80 Millionen Jahre beherrschten sie den Luftraum der Erde, bevor der Chicxulub-Impakt ihnen wie den Dinosauriern zum Verhängnis wurde. Wahrscheinlich bereitete ihnen nicht nur ihre schiere Größe den Garaus – ein derartiger Körper muss ja ernährt werden –, sondern auch die nach dem Einschlag fehlende Thermik, die sie für das Fliegen und damit die Nahrungssuche gebraucht hätten. Überlebende konnten sich einfach nicht in der Luft halten.

»Meine« Vögel, die übrigens keine direkten Nachkommen der Pterosaurier sind, überlebten dagegen dank der geringeren Größe einiger Arten, die sich wahrscheinlich von Samen ernährten. Ihr Aufstieg erfolgte nach der globalen Katastrophe, so dass ich heute mehr als 11000 Arten in allen Farben und Formen bewundern kann. Nur die richtigen Riesen, die fehlen.

Gar nicht so leicht am (nächtlichen) Himmel können wir dagegen Pluto sehen. Die Erkundung des Zwergplaneten nahm daher erst wieder mit der Mission »New Horizons« richtig Fahrt auf. Die Sonde sammelte so viel Material über Pluto, dass Astronomen sicher noch Jahre mit der Auswertung beschäftigt sein werden. Inzwischen nehmen sie sich die dunkle Rückseite unseres entferntesten Nachbarn vor, wie Shannon Hall ab S. 44 erzählt. Warten wir ab, welche Überraschungen uns dort noch erwarten – ich bin gespannt.

Viel Freude beim Erkunden wünscht



AB 24. 10. AM KIOSK!

Spektrum GESCHICHTE 5.20

Auf dem Meeresboden schlummern Artefakte von Steinzeitmenschen und Schiffswracks. Bauarbeiten und Schleppnetze zerstören vieles davon – für Archäologen ein Wettlauf gegen die Zeit.

IN DIESER AUSGABE



HEINER FANGERAU, ALFONS LABISCH

Mit der Zunahme des weltweiten Personen- und Güterverkehrs sind Pandemien häufiger geworden. Der Rückblick auf frühere Seuchen ist in mancher Hinsicht aufschlussreich (S. 28).



ARMIN ISKE, STEPHAN JURICKE

Die mathematischen Modellierer untersuchen, wie Klimasimulationen zuverlässiger werden können. Die Schwierigkeiten beim Erfassen kleinräumiger Geschehnisse erläutern sie ab S. 54.



JOHANNES MÜLLER, WIEBKE KIRLEIS, ROBERT HOFMANN

Wie vor 6000 Jahren die ersten Metropolen Europas organisiert waren, erforschen die Archäologen der Universität Kiel. Ab S. 78 rekonstruieren sie das Leben in den uralten Planstädten.

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

20 FORSCHUNG AKTUELL

Weltrekord in der Kryoelektronenmikroskopie

Erstmals konnten Forscher einzelne Atome abbilden.

Homo sapiens kam noch früher nach Europa

Funde aus Bulgarien belegen die Ankunft des anatomisch modernen Menschen in Europa vor 45000 Jahren.

Verflochtene Teilchen

Nach langer Suche gibt es endlich einen Nachweis von Anyonen.

27 SPRINGERS EINWÜRFE

Tut die Pandemie der Umwelt gut?

Die Einschränkungen helfen nur auf den ersten Blick.

42 ZEITREISE

43 FREISTETTERS FORMELWELT

Die unmögliche Trompete

Kein Instrument, sondern handfeste Mathematik.

52 SCHLICHTING!

Wenn der Wind die Harfe spielt

Wirbelnde Luft pupft weithin hörbar an Drähten.

88 REZENSIONEN

95 LESERBRIEFE

97 IMPRESSUM

96 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

98 VORSCHAU

12 PTEROSAURIER **HERRSCHER DES URZEITHIMMELS**

Wie konnten sich die riesigen Flugsaurier einst in die Lüfte erheben? Mit Fossilien und mathematischen Modellen lässt sich dieses Rätsel lösen.

Von Michael B. Habib

28 MEDIZINGESCHICHTE **VON CHOLERA BIS CORONA**

Historische Pandemien trieben stets den Ausbau der öffentlichen Gesundheitssicherung voran. Heute greifen wir auf die dabei entstandenen Institutionen zurück.

Von Heiner Fangerau und Alfons Labisch

36 EPIDEMIOLOGIE **DICKE LUFT**

Mit der Menge an Feinstaub steigt auch die Häufigkeit von Demenzerkrankungen. Neuere Untersuchungen zeigen, wie die Staubpartikel von Lunge und Nase zum Gehirn gelangen, wo sie viel Schaden anrichten können.

Von Ellen Ruppel Shell

44 SONNENSYSTEM **PLUTOS DUNKLE SEITE**

Fünf Jahre nach dem Vorbeiflug der NASA-Raumsonde New Horizons lernen Forscher noch immer Neues über den fernen Zwergplaneten.

Von Shannon Hall

54 SIMULATIONEN **WIE EIN KLIMAMODELL ENTSTEHT**

Serie: Klimawandel (Teil 3) Mathematische Methoden machen das komplexe Geschehen in der Atmosphäre und den Ozeanen berechenbar.

Von Armin Iske und Stephan Juricke

62 INTERVIEW **»WIR MÜSSEN DEN BIODIVERSITÄTSSUBSTRATEN EINE CHANCE GEBEN«**

Serie: Kunststoffe heute und morgen (Teil 3) Die Polymerforscher Frederik Wurm und Hans-Josef Endres diskutieren über den Sinn und Unsinn von kompostierbarem und pflanzenbasiertem Plastik.

Von Verena Tang

68 KÜNSTLICHE INTELLIGENZ **DER GESUNDE MASCHINENVERSTAND**

Computer können zwar Texte schreiben, verstehen sie jedoch nicht. Ein neuer Ansatz versucht nun Maschinen beizubringen, logische Schlüsse zu ziehen.

Von John Pavlus

74 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN **VIELE WEGE FÜHREN DURCH MANHATTAN**

Der Abstandsbegriff ist nicht nur in der Mathematik vielfältig, er kann auch im Alltag zu Verwirrung führen.

Von Dustin Schiering

78 ARCHÄOLOGIE **EUROPAS ERSTE METROPOLEN**

Vor 6000 Jahren entstanden in der heutigen Ukraine riesige Planstädte. Wie ließen sich die Mammutprojekte mit den Mitteln der Kupferzeit durchführen?

Von Johannes Müller, Wiebke Kirleis und Robert Hofmann

TITELBILD:
WARPCOBR / GETTY IMAGES / ISTOCK
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



12

**PTEROSAURIER
HERRSCHER DES URZEITHIMMELS**

WARPAINT/OBBA / GETTY IMAGES / ISTOCK

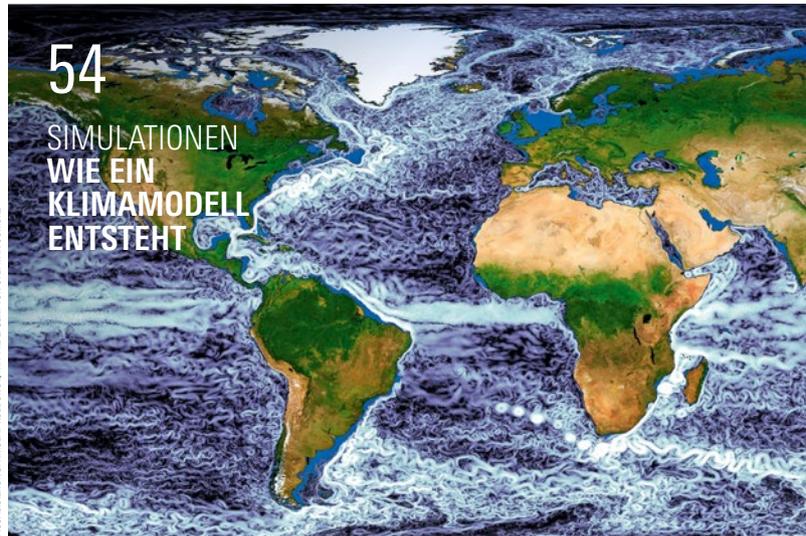


ALAMY / VINTAGE SPACE

28

**MEDIZIN
HISTORISCHE
PANDEMIEN**

VISUALISIERUNG: NIKOLAJ KOLDUNOV, MIT FRIEDL. GEN. VON STEPHAN JURICKE



54

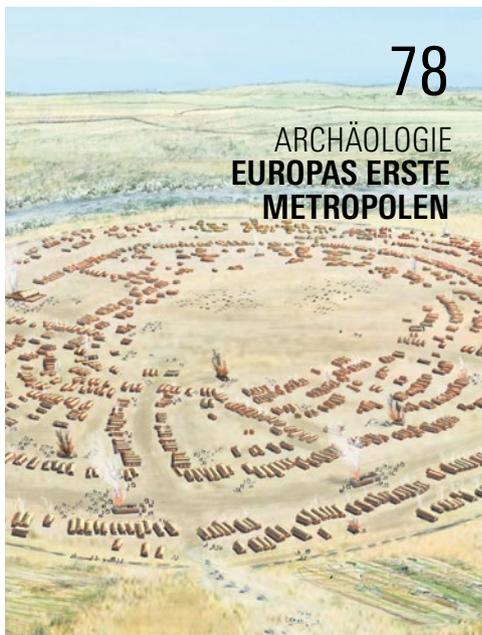
**SIMULATIONEN
WIE EIN
KLIMAMODELL
ENTSTEHT**



BRISQ / GETTY IMAGES / ISTOCK

68

**KÜNSTLICHE INTELLIGENZ
DER GESUNDE
MASCHINENVERSTAND**



SUSANNE BEYER, INSTITUT FÜR UR- UND FRÜHGESCHICHTE, UNI WÜRZBURG

78

**ARCHÄOLOGIE
EUROPAS ERSTE
METROPOLLEN**



Alle Artikel auch digital auf [Spektrum.de](https://www.spektrum.de)

Auf [Spektrum.de](https://www.spektrum.de) berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

GRÖNLÄNDISCHE EISKÜSTE

► Selbst im Hochsommer wird die Ostküste Grönlands von Meereis umklammert. Auf diesem Bild des NASA-Satelliten Aqua aus dem Juli 2020 ist das Fjordsystem Kangerittivaq (dänisch: Scoresby Sund) zu sehen, dessen Bucht zahlreiche Schollen versperren. Das Eis sammelt sich entlang der gesamten sichtbaren Meeresküste. Eigentlich stammt es aus dem Arktischen Ozean 1000 Kilometer weiter nördlich. Durch die Framstraße zwischen Grönland und Spitzbergen kann es nach Süden bis zum 70. Breitengrad driften.

Insgesamt gab es diesen Sommer in der Arktis nur sehr wenig Meereis: Am jährlichen Tiefpunkt Mitte September waren rund um den Nordpol nur noch 3,8 Millionen Quadratkilometer davon bedeckt, was 90 Prozent der Fläche der EU entspricht. Damit erreicht 2020 Platz zwei der Rangliste der eisärmsten Jahre seit Beginn der Satellitenbeobachtungen, berichtet das Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven. Nur 2012 hatte das Meer eis eine um nochmals 0,5 Millionen Quadratkilometer geringere Ausdehnung.

Der Grund für das diesjährige Extrem ist unter anderem eine Hitzeperiode über Sibirien im Mai und Juni. Auch hatte sich am russischen Rand des Arktischen Ozeans im vergangenen Winter nur vergleichsweise dünnes Meereis gebildet, das ablandige Winde nach Norden getrieben haben.

Pressemitteilung des Alfred-Wegener-Instituts, September 2020



NASA EARTH OBSERVATORY, LAUREN DALPHIN
EARTH OBSERVATORY NASA GOV/IMAGES/18574/
SEA ICE IN DENMARK STRAIT.

ASTRONOMIE URSPRUNG DES MAGELLANSCHEN STROMS

► Könnten Menschen es sehen, wäre es wohl eine der spektakulärsten Himmelserscheinungen auf der Südhalbkugel: ein langes, mehrgliedriges Band, das sich quer über das halbe Firmament zieht. Da dieser »Magellansche Strom« jedoch vor allem aus Gas besteht, ist er für das bloße Auge unsichtbar. Aufspüren lässt er sich lediglich mit speziellen Teleskopen, die andere Wellenlängen auffangen als die des sichtbaren Lichts.

Forscher rätseln seit Jahrzehnten über den Ursprung der rund 180000 Lichtjahre entfernten Struktur, deren Gesamtmasse sie auf mehr als eine Milliarde Sonnen schätzen. Fest steht, dass das Phänomen etwas mit den

beiden Magellanschen Wolken zu tun hat. Die beiden Zwerggalaxien kreisen in einem Abstand von 160000 bis 200000 Lichtjahren um unsere Milchstraße und sind als diffuse Lichthöfe am südlichen Nachthimmel erkennbar. Vermutlich hat unsere Galaxie sie vor ein paar Milliarden Jahren eingefangen.

Im Vorfeld müssten Gezeitenkräfte der sich umkreisenden Zwerggalaxien große Mengen Gas aus den Welteninseln gelöst haben, das ihnen nun auf ihrer Bahn um die Milchstraße folgt. Mit diesem Szenario lässt sich allerdings nur ein kleiner Teil der Masse des Magellanschen Stroms erklären. Astrophysiker um Scott Lucchini von

der University of Wisconsin-Madison glauben nun herausgefunden zu haben, woher der Rest kommt: Offenbar umgibt die beiden Zwerggalaxien ein ausgedehnter Kokon aus heißem, ionisiertem Gas.

Wenn diese »Magellansche Corona« einst so schwer wie drei Milliarden Sonnen war, müsste die Milchstraße bei der Kollision ein gutes Fünftel ihrer Masse abgesaugt haben, folgern die Forscher aus Simulationen. Das wäre genug, um den markanten Gasstrom am Südsternhimmel vollständig zu erklären.

Nature 10.1038/s41586-020-2663-4, 2020

Könnte man Wasserstoffgas mit bloßem Auge sehen, wären die Große und die Kleine Magellansche Wolke von ausgedehnten Kokons umgeben. Von ihnen geht ein quer über den Himmel laufendes Band aus, der »Magellansche Strom«.

COIN LEGS / SCOTT LUCCHINI

ARCHÄOLOGIE KNOCHENBRAUCH AUS DER BRONZEZEIT

► In der Bronzezeit haben Bewohner Großbritanniens offenbar die Knochen ihrer Ahnen verehrt und diese jahrzehntelang aufbewahrt. Das jedenfalls folgern zwei Wissenschaftler aus verbesserten Radiokarbonanalysen, mit denen sie das Alter archäologischer Funde aus England präzisiert haben. Bei 23 von 55 Bestattungen aus dem Zeitraum von 2500 bis 600 v. Chr. wurden demnach Knochen begraben, die Jahrzehnte älter sind als andere Gegenstände im selben Grab, berichten Thomas Booth vom Francis Crick Institute in London und Joanna Brück vom University College Dublin.

Aus Sicht der Archäologen lässt sich das am besten erklären, wenn die Knochen eine kulturelle Bedeutung für die Menschen hatten: Vermutlich habe es sich um die Überreste der unmittelbaren Vorfahren gehandelt oder um die wichtiger Würdenträger des Stamms, an die man sich sogar

nach ein oder zwei Generationen noch erinnerte. Möglicherweise habe man die Überreste der Verstorbenen zentral gesammelt und sie als rituelle Beigabe bei neuen Begräbnissen verwendet, spekulieren die Forscher. Denkbar sei aber auch, dass die Menschen damals die Gebeine gezielt ausstellten.

Die Bräuche dürften sich je nach Kultur und Zeit stark unterschieden haben. In einer Bronzezeit-Fundstätte nahe der englischen Gemeinde Ingleby Barwick hat beispielsweise jemand zwei deutlich ältere Erwachsenenschädel in das Grab einer Frau gelegt. Eine in Cambridgeshire bestattete, von

einem Schwert beschädigte Schädelplatte ist dagegen nicht merklich älter als im selben Grab beigelegte Tierüberreste – entsprechend könnte der Skeletteil allenfalls einige Jahre als Trophäe oder Mahnmal gedient haben.

Bei manchen Knochen scheint wiederum die Form die These der Forscher zu stützen. Dazu zählt vor allem ein abgebrochener Oberschenkelknochen aus einem Grab in Wilsford in der Nähe von Stonehenge. Er erinnert stark an eine Flöte und könnte folglich ein Musikinstrument gewesen sein.

Antiquity 10.15184/aqy.2020.152, 2020



Ein menschlicher Oberschenkelknochen aus Wilsford bei Stonehenge könnte einst als Musikinstrument gedient haben.

WILSFORD MUSEUM

MEDIZIN WARUM COVID-19 MANCHE PATIENTEN HÄRTER TRIFFT

► Bei älteren Menschen und Männern nimmt Covid-19 mit einer höheren Wahrscheinlichkeit einen schweren oder tödlichen Verlauf. Der Grund dafür scheinen Unterschiede im Immunsystem zu sein. Darauf deuten Untersuchungen einer Forschergruppe um Nicole Lieberman von der University of Washington School of Medicine in Seattle hin.

Die Forscher analysierten Abstriche von 430 Patienten, die positiv auf Sars-CoV-2 getestet worden waren. Dabei untersuchten sie, welche Gene in den Zellen der Patienten besonders aktiv waren und welche Immunprozesse in deren Körpern abliefen, verglichen mit 54 negativ getesteten Kontrollpersonen. Außerdem führten sie Versuche mit Zellen aus menschlichem Atemwegsepithel durch, die sie in der Petrischale mit Sars-CoV-2 infizierten.

Laut der Untersuchung dauerte es nach einer Infektion nur wenige Tage, bis Immunzellen aktiv wurden. Wie die Immunantwort konkret ausfiel, hing vor allem von der Viruslast ab. Bei Patienten über 60 Jahren scheint der Organismus nach der Ansteckung weniger entzündungsfördernde Signalprozesse zu aktivieren, berichten die Forscher.

Das führt wahrscheinlich dazu, dass weniger T-Lymphozyten und Killerzellen auf den Plan gerufen werden, um virusinfizierte Zellen abzutöten. Bei Männern wiederum stellt sich nach der Infektion eine geringere Aktivität von B-Lymphozyten ein als bei Frauen; zudem zeigen sie schwächere Entzündungsreaktionen. Möglicherweise schüttet der männliche Organismus mehr Signalstoffe aus, die Entzündungen entgegenwirken.

Lieberman und ihr Team vermuten, dass männliche und ältere Patienten unter anderem deswegen eine Infektion mit Sars-CoV-2 tendenziell schlechter überstehen. Die Autoren schreiben aber auch, es brauche noch mehr Studien, um die Immunreaktionen bei Covid-19-Patienten genauer aufzuklären. So seien Abstriche aus dem Nasen-Rachen-Raum nur begrenzt geeignet, um Immunprozesse zu untersuchen.

Laut verschiedenen Studien aus Europa stirbt etwa 1 von 1000 Menschen unter 50 Jahren, die sich mit dem Coronavirus anstecken. Bei Menschen über 50 Jahren sind es etwa 5 von 1000, bei Personen ab Mitte 70 bereits 116 von 1000. Männer haben dabei ein etwa doppelt so hohes Risiko wie Frauen, an Covid-19 zu sterben.

PLoS Biology 10.1371/journal.pbio.3000849, 2020

PHYSIK KORRIGIERTE ATOMKERNMASSE

► Mehr als 100 Jahre nach Entdeckung der Atomkerne haben Physiker eine sehr präzise Vorstellung davon, wie schwer einzelne Exemplare sind. Doch wenn es um die zehnte bis zwölfte Nachkommastelle geht, besteht mitunter noch erhebliche Unsicherheit. Das klingt vernachlässigbar, kann aber leicht andere Messungen im Mikrokosmos verfälschen.

Ein Forscherteam um Sascha Rau vom Max-Planck-Institut für Kernphy-

sik in Heidelberg ist nun solch einer Unstimmigkeit mit potenziell weit reichenden Folgen auf die Schliche gekommen: Die Masse des Deuterons liege bei 2,013553212535 atomaren Masseneinheiten ($1,66 \cdot 10^{-27}$ Kilogramm) und sei damit um zehn milliardestel Prozent geringer als der in der Fachliteratur hinterlegte Wert, berichten die Forscher.

Das Deuteron ist der Kern von Deuterium, auch bekannt als schwerer Wasserstoff. Statt nur aus einem Proton besteht es aus einem Proton und einem Neutron. Die Forscher bestimmten die Masse des Kerns mit einer so genannten Penning-Falle, die

einzelne Atomkerne in einem starken Magnetfeld einfängt. Dort bewegen sich die geladenen Teilchen auf gekrümmten Bahnen und rufen dadurch am Rand der Falle in periodischen Abständen kleine Strompulse hervor. Über diese lässt sich die Kreisfrequenz des Atomkerns rekonstruieren und darüber die Masse. Die Methode gilt als extrem präzise, da die Forscher mit ihr einen direkten Vergleich zu anderen Atomkernen anstellen können, deren Masse genauer bekannt ist. Somit lassen sich verschiedene Elemente gewissermaßen wie auf einer Balkenwaage ausbalancieren.

Nature 10.1038/s41586-020-2628-7, 2020



JOE TOMOLEONI



J. TOMOLEONI / USIS

BIOLOGIE SEEOTTER UND DER KLIMAWANDEL

► Wegen seines dichten, weichen Fells haben Menschen den Seeotter bis an den Rand der Ausrottung bejagt. Heute stehen die Tiere zwar unter strengem Schutz, dennoch gehen ihre Bestände mancherorts weiter oder erneut zurück, etwa weil sie vermehrt von Schwertwalen gefressen werden. In den Küstenökosystemen des nordöstlichen Pazifiks spielen Seeotter allerdings eine sehr wichtige Rolle. Ihr Verschwinden löst daher Kettenreaktionen aus, die von den Folgen des Klimawandels noch verstärkt werden, wie nun Biologen um Douglas Rasher vom Bigelow Laboratory for Ocean Sciences im US-Bundesstaat Maine herausgefunden haben.

Seeotter fressen Seeigel, die sich wiederum von Seetang und Kalkriffe bildenden Rotalgen der Art *Clathromorphum nereostratum* ernähren. Ohne die marinen Marder können sich die Seeigel stark vermehren und damit das Ökosystem beeinträchtigen. Das lässt sich unter anderem vor den Aleuten zwischen Alaska und Sibirien beobachten, berichten Rasher und seine Kollegen: Nach dem Verschwinden der Seeotter vernichteten die massenhaft auftretenden Seeigel zuerst die Seetangwälder, indem sie den neu aufkommenden Kelp fraßen. Nachdem diese leichter zugängliche Nahrung erschöpft war, wandten sich die Tiere den Rotalgen zu.

Dabei richteten sie größere Schäden an als in früheren Jahrzehnten, als die Population der Seeotter schon einmal auf einem Tiefpunkt war. Offenbar verschärfen die steigenden Wassertemperaturen und die Versauerung des Ozeans die Situation, folgern

Da es weniger Seeotter (links) gibt, leiden Kalkalgenriffe vor den Aleuten. Sie werden zunehmend von Seeiegeln gefressen (rechts).

die Wissenschaftler aus historischen Daten und Laborexperimenten. Demnach können Kalkalgen bei den aktuellen Umweltbedingungen ihre Schutzhülle schlechter aufbauen, weshalb sie dünner bleibt und leichter von Seeiegeln geknackt werden kann.

Die Biologen befürchten, dass sich der Trend fortsetzen könnte und die Riffe in den nächsten Jahren einen Punkt erreichen, an dem sie irreversibel geschädigt sind. Eine Erholung der Seeotterbestände würde den Prozess verlangsamen, argumentieren die Forscher: Die Raubtiere fressen pro Tag bis zu 1000 Seeigel und können deren Population deutlich verkleinern.

Science 10.1126/science.aav7515, 2020

MATERIALWISSENSCHAFT VERBESSERTE GEDÄCHTNISLEGIERUNG

► Formgedächtnislegierungen wirken auf den ersten Blick wie Zauberei: Verbiegt man sie gewaltsam und löst anschließend den Druck, finden sie wieder in ihre ursprüngliche Form zurück. Möglich macht es das besondere Atomgitter der Materialien, das sich vorübergehend in eine energetisch weniger effiziente Konfiguration schieben lässt, nur um bei erster bester Gelegenheit wieder zurückzuschleunigen.

Bisher hängt dieses als »Superelastizität« bekannte Phänomen jedoch stark von der Temperatur des Materials ab. Beispielsweise verändert sich mit der Gradzahl der Druck, ab dem sich eine Legierung verformen lässt.

Auch funktioniert der Trick überhaupt nur in einem bestimmten Temperaturbereich. Bei den für ihr Formgedächtnis bekannten Nickel-Titan-Legierungen ist das zum Beispiel ein knapp 100 Grad großes Fenster rund um die Raumtemperatur.

Das ist genug für den Nischeneinsatz in Medizin und Maschinenbau, aber zu wenig für ambitionierte Anwendungsgebiete wie etwa die interplanetare Raumfahrt. Daher hat ein Forscherteam um Ji Xia von der Universität Tohoku in Japan nun eine neue Formgedächtnislegierung aus Eisen, Mangan, Aluminium, Chrom und Nickel entwickelt, die man im Temperaturbereich zwischen minus

260 und plus 130 Grad Celsius reversibel verformen kann.

Dabei scheint das Chrom dem Atomgitter die gewünschte Flexibilität zu verleihen. Über seinen Gehalt ließ sich sogar der Druck einstellen, ab dem man die Legierung verformen kann, berichten die Wissenschaftler nach ausführlichen Tests. Sie hoffen nun, dass ihre Erfindung Ingenieure zu neuartigen Anwendungen inspiriert, etwa auf dem Mond, wo der Temperaturunterschied zwischen Tag- und Nachtseite mitunter 300 Grad beträgt.

Science 10.1126/science.abc1590, 2020

PLANETENFORSCHUNG VERDÄCHTIGES SPURENGAS AUF DER VENUS

► Astronomen haben in der Atmosphäre der Venus einen Stoff entdeckt, den man dort nicht erwarten würde: Monophosphan (PH_3) besteht aus einem Phosphor- und drei Wasserstoffatomen und kommt auf der Erde unter anderem als Schädlingsbekämpfungsmittel zum Einsatz. Die hochreaktive Verbindung lässt sich nicht nur industriell herstellen, sondern

wird auch beim Stoffwechsel mancher Bakterienarten ausgeschieden, etwa in Mooren und Sümpfen.

Auf der Venus kann PH_3 prinzipiell auf geochemischem Weg entstehen, also ohne Beteiligung von Lebewesen, etwa durch Blitzentladungen, Vulkanausbrüche oder Meteoriteneinschläge. Doch keine dieser Quellen kann die hohe Konzentration an Monophosphan erklären, die das internationale Team um Jane Greaves von der Cardiff University aufgespürt hat. Laut Messungen mit dem Submillimeter-Observatorium ALMA in Chile und dem James Clerk Maxwell Telescope

in Hawaii kommen auf eine Milliarde Moleküle in der Venusatmosphäre 20 Moleküle PH_3 (20 ppb, parts per billion).

Die Forscher entdeckten das Spurengas, da es Strahlung mit einer Wellenlänge von 1,123 Millimetern zurückhält. Dieser Teil fehlt daher im Radiowellenspektrum, das die Venus ins Weltall abstrahlt. Den Messungen zufolge müsste sich das Monophosphan vor allem in der Wolkendecke in 50 bis 70 Kilometer Höhe sammeln. Dort sind Druck und Temperatur mit der Erde vergleichbar, anders als auf der Venusoberfläche, wo das Thermometer auf 450 Grad Celsius steigt und der Druck Werte wie am Meeresgrund erreicht. Die Forscher um Greaves halten daher einen biologischen Ursprung des PH_3 für denkbar, was weltweit für Schlagzeilen gesorgt hat. Weitaus wahrscheinlicher dürfte jedoch ein bisher unbekannter geochemischer Prozess in der Atmosphäre sein, betont das Team. Über die Wolken der Venus ist bisher nur wenig bekannt, da dort erst zweimal sowjetische Ballon-Sonden rudimentäre Vor-Ort-Messungen durchgeführt haben, jeweils in den 1980er Jahren.

Nature Astronomy 10.1038/s41550-020-1174-4, 2020

Unseren Nachbarplaneten Venus umhüllt eine lückenlose Wolkendecke, die vor allem aus Schwefelsäuretröpfchen besteht.



PTEROSAURIER HERRSCHER DES URZEITHIMMELS

Anhand von Fossilien und mathematischen Modellen versuchen Paläontologen zu ergründen, wie die riesigen Flugsaurier sich einst in die Lüfte erhoben haben.



Michael B. Habib ist promovierter Paläontologe an der University of Southern California in Los Angeles (USA). Er interessiert sich vor allem für Anatomie und Biomechanik von Pterosauriern, Vögeln sowie gefiederten Dinosauriern.



► spektrum.de/artikel/1773705



In der Kreidezeit des Erdmittelalters zog der Kurzschwanzflugsaurier *Pteranodon* seine Kreise über dem heutigen Nordamerika.

Das Erdmittelalter von vor 252 bis vor 66 Millionen Jahren gilt als Zeitalter der Dinosaurier. Tatsächlich beherrschten die »schrecklichen Echsen« die Lebensräume an Land – doch die Lufthoheit blieb anderen Giganten vorbehalten: den mit ihnen verwandten Pterosauriern.

Lange bevor Vögel vom Boden abhoben, eroberten die Flugsaurier den Himmel und waren somit die ersten Wirbeltiere, die aktiv fliegen konnten. Mehr als 160 Millionen Jahre lang gediehen sie, um dann gegen Ende der Kreidezeit vor 66 Millionen Jahren zusammen mit allen Dinosauriern außer den Vögeln zu verschwinden. In dieser Zeit entwickelten sich bei ihnen einige der außerordentlichsten anatomischen Anpassungen, die es jemals bei Tieren gab (siehe »Groß und gruselig«, S. 16/17). Die kleinsten unter den fliegenden Raubtieren besaßen die Ausmaße eines Spatzen. Die Flügelspannweite der größten entsprach der eines kleinen Düsenjets. Bei vielen von ihnen war der Kopf größer als der Körper. Als fliegende Schlünde patrouillierten Pterosaurier über alle Ozeane und Kontinente der Erde. Kein Tier des Erdmittelalters blieb vor ihrem scharfen Blick sicher.

Im Gegensatz zu den Dinosauriern, die als Vögel bis heute überdauerten, besitzen die Pterosaurier keine noch lebenden Nachfahren. Deshalb stammen alle Erkenntnisse über sie ausschließlich von Fossilien. Doch die leider nur lückenhaft überlieferten Funde vermitteln uns bloß einen blassen Schimmer der einstigen Pracht dieser Reptilien und hinterlassen eine Fülle an Fragen zu ihrer bizarren Anatomie sowie ihrem unglücklichen Schicksal. Über solche Rätsel brüten Paläontologen schon seit Jahrzehnten. Neue Fossilfunde kombiniert mit mathematischen Modellen, welche die anatomischen Strukturen stark vereinfachen, um physikalische Eigenschaften wie Kraft, Masse oder Geschwindigkeit abzuschätzen, erlauben inzwischen aber überraschende Einblicke. Demnach waren die Flugsaurier noch außergewöhnlicher, als wir es uns jemals vorgestellt haben.

Mysteriös erscheint vor allem, wie die größten Vertreter der Gruppe sich überhaupt in die Luft erheben konnten. Giganten wie *Quetzalcoatlus*, der zuerst in Texas entdeckt wurde, und *Hatzegopteryx* aus dem heutigen Rumänien erreichten Ausmaße einer Giraffe und besaßen Flügel-

spannweiten von über zehn Metern. Der Unterkiefer dieser Tiere war doppelt so lang wie der eines *Tyrannosaurus rex*. Der Umfang ihrer Oberarme entsprach dem des Rumpfs eines erwachsenen Menschen. Mit einem Gewicht von mehr als 300 Kilogramm wirkten sie wie wahre Monster. Zum Vergleich: Einer der größten Vögel, der jemals vom Boden abhob – der vor sechs Millionen Jahren im heutigen Argentinien heimische *Argentavis* – wog wahrscheinlich weniger als 75 Kilogramm.

Einzigartige Anatomie

Wegen des eklatanten Gewichtsunterschieds zwischen Vögeln und Pterosauriern bezweifelten etliche Wissenschaftler, dass die größten Vertreter überhaupt fliegen konnten – trotz der dann rätselhaft erscheinenden anatomischen Anpassungen an den Flug. Andere vermuteten, die Reptilien hätten nur unter besonderen Umweltbedingungen abheben können, etwa auf Grund einer dichteren Atmosphäre als heute. Unbestreitbar könnten Vögel solcher Ausmaße nicht fliegen: Wie Berechnungen von mir und weiteren Forschern ergaben, hätte es deren Kräfte überfordert, sich in die Luft zu erheben.

Aber Pterosaurier waren keine Vögel. In den letzten Jahren haben meine Kollegen und ich mehrfach die nötige Kraft der Tiere ermittelt, um vom Boden zu starten und zu fliegen. Damit konnten wir nicht nur nachweisen, dass riesige Vertreter dieser Gruppe das tatsächlich schafften, sondern auch, dass es dafür vermutlich noch nicht einmal besonderer Voraussetzungen bedurfte. Geochemische Analysen von Sedimentgesteinen sowie mikroanatomische Untersuchungen an Pflanzenfossilien bestätigen das: Demnach unterschieden sich die Luft- und Landschaftsverhältnisse in der oberen Kreide – der Blütezeit der großen Pterosaurier – nicht nennenswert von den heutigen. Anders und einzigartig war vielmehr die Anatomie der Giganten.

Damit ein Tier auch bei gewaltiger Größe fliegen kann, sind drei Dinge notwendig. Erstens bedarf es eines im Verhältnis zur Masse sehr kräftigen Skeletts, also eines mit großem Volumen und geringer Dichte. So etwas zeichnet sowohl Flugsaurier als auch Vögel aus: Viele ihrer Knochen sind hohl. Beispielsweise besaß der Oberarmknochen von *Quetzalcoatlus* lediglich eine Wandstärke von drei Millimetern – was der Schale eines Straußeneies entspricht –, doch der Durchmesser des Knochens betrug am Ellenbogen mehr als 25 Zentimeter.

Zweitens brauchen riesige Flieger einen hohen maximalen Auftriebsbeiwert. Diese Zahl beschreibt, welchen Auftrieb die Flügel bei gegebener Geschwindigkeit und Fläche erzeugen. Mit einem höheren Wert kann ein Tier schwerer sein, weil seine Flügel auch bei geringerer Geschwindigkeit mehr Masse tragen. Dadurch vermag das Individuum mit einem niedrigeren Tempo abzuheben, was sich erheblich auf die zum Start erforderliche Muskelkraft auswirkt. Flughäute wie die der Pterosaurier und Fledermäuse liefern je Geschwindigkeits- und Flächeneinheit mehr Auftrieb als die gefiederten Flügel der Vögel. Das verbessert die Manövrierfähigkeit bei geringer Geschwindigkeit – kleinere Tiere können engere Kurven fliegen, während es größeren Start und Landung erleichtert.

AUF EINEN BLICK LUFTHOHEIT IM ERDMITTELALTER

- 1** Pterosaurier waren die ersten Wirbeltiere, die aktiv fliegen konnten – 80 Millionen Jahre vor den Vögeln. Während ihrer langen Vorherrschaft im Mesozoikum erreichten diese Reptilien gigantische Ausmaße.
- 2** Sie konnten sich in die Lüfte erheben, weil sie zum Start alle vier Extremitäten einsetzten. Dabei half ihnen vermutlich ein ausgeklügelter Katapultmechanismus.
- 3** Am Ende der Kreidezeit starben sie wohl auch wegen ihrer Dimensionen aus – und überließen den Vögeln als Nachfahren der Dinosaurier die Lufthoheit.

Die dritte und wichtigste Voraussetzung ist eine ausreichende Kraft beim Start. Selbst mit sehr leistungsfähigen Flügeln muss ein schweres Flugtier eine starke Sprungkraft aufbringen, um sich in die Luft zu erheben. Einfach nur mit den Flügeln zu schlagen, genügt nicht, und auch ein Sturz von Klippen oder anderen erhöhten Stellen hilft wenig. Flügel erzeugen bei geringem Tempo kaum Auftrieb, und ein Start mit Hilfe der Schwerkraft erfordert eine Beschleunigung in die falsche Richtung – ein gefährliches Unterfangen. Ein Sprung dagegen liefert die notwendige Geschwindigkeit und Höhe, um den Flug zu beginnen. Je stärker dabei die Kraft ist, desto leichter gestaltet sich das Abheben. Große Flieger müssen deshalb gute Springer sein.

Viele Vögel sind entsprechend zu beeindruckenden Hüpfen in der Lage. Ihre Abstammung als theropode Dinosaurier legt ihnen jedoch eine Beschränkung auf: Wie ihre Vorfahren laufen alle Vögel auf zwei Beinen. Pterosaurier dagegen waren am Boden Vierbeiner. Zusammengefaltet konnten sie ihre Flügel zum Laufen und damit auch zum Springen verwenden. Zahlreiche ausgezeichnet erhaltene fossile Spuren bestätigen als »Startbahnen« diese anatomische Kuriosität. Vierfüßigkeit verändert drastisch die Maximalgröße von Fliegern. Indem Pterosaurier nicht nur ihre Hintergliedmaßen zum Start benutzen konnten, sondern auch die viel größeren vorderen Extremitäten, verfügten sie dafür über mehr als doppelt so viel Kraft. Somit besaßen sie die ideale Merkmalskombination, um sich zu fliegenden Monstern zu entwickeln (siehe »Auf und davon«, S. 18).

Frühere Studien modellierten das Abheben großer Flugsaurier noch auf der Grundlage von zwei Beinen. So berechneten der Paläontologe Sankar Chatterjee von der Texas Tech University und der kanadische Aerodynamikexperte Jack Templin 2004, wie sich *Quetzalcoatlus* ausschließlich mit seinen Hinterextremitäten in die Luft hätte erheben können. Demnach hätte das Tier nicht mehr als 75 Kilogramm wiegen dürfen und bei Gegenwind bergab laufen müssen. Ein vierbeiniger Start dagegen erlaubt ein realistischeres Körpergewicht und setzt weniger einschränkende Umweltbedingungen voraus.

Abgesehen von ihrer beeindruckenden Gesamtgröße zeichnen sich die Flugsaurier durch geradezu bizarre Körperproportionen und seltsam gestaltete Gliedmaßen aus. Von sämtlichen Wirbeltieren besaßen sie wohl die am stärksten spezialisierten Vorderextremitäten, deren immens vergrößerter vierter Finger den Flügel trug. Das überrascht kaum, ermöglichte doch erst die ungewöhnliche Handkonstruktion als unverzichtbares Element des Pterosaurierflügels die Flugfähigkeit der Reptilien. Was aber sowohl Wissenschaftler als auch Fossilienforscher verwirrt, sind nicht die Flügel der Pterosaurier, sondern deren Köpfe.

Bereits die ersten Flugsaurier besaßen extravagante Schädel: Bei *Rhamphorhynchus* beispielsweise, einer typischen Gattung aus dem oberen Jura vor etwa 150 Millionen Jahren, war er fast so lang wie der gesamte übrige Körper. In der Kreidezeit nahm der Kopf noch extremere Ausmaße an. Wie man an Fossilien wie *Quetzalcoatlus* oder auch an *Anhanguera* aus Brasilien erkennt, wuchsen die Pterosaurier zwar insgesamt an, ihre Köpfe erreichten allerdings geradezu gigantische Ausmaße. Ein klassischer

Flugsaurierschädel aus der Kreide konnte unter Umständen zwei- bis dreimal länger sein als das restliche Skelett zwischen Schultern und Hüften. In manchen Fällen übertraf der Schädel die Körperlänge sogar um das Vierfache. Dabei war jedoch der Hirnschädel dieser Tiere nicht übermäßig groß. Vielmehr erschienen vor allem Gesicht und Unterkiefer unfassbar stark verlängert. Das extravagante Äußere trieben anatomische Besonderheiten wie Knochenspannen am Unterkiefer oder aufragende Schädelkämme weiter auf die Spitze. Insgesamt wirkte der Kopf so, als gehörte er zu einem ganz anderen Wesen.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



BASTOS / STOCKADOB.COM

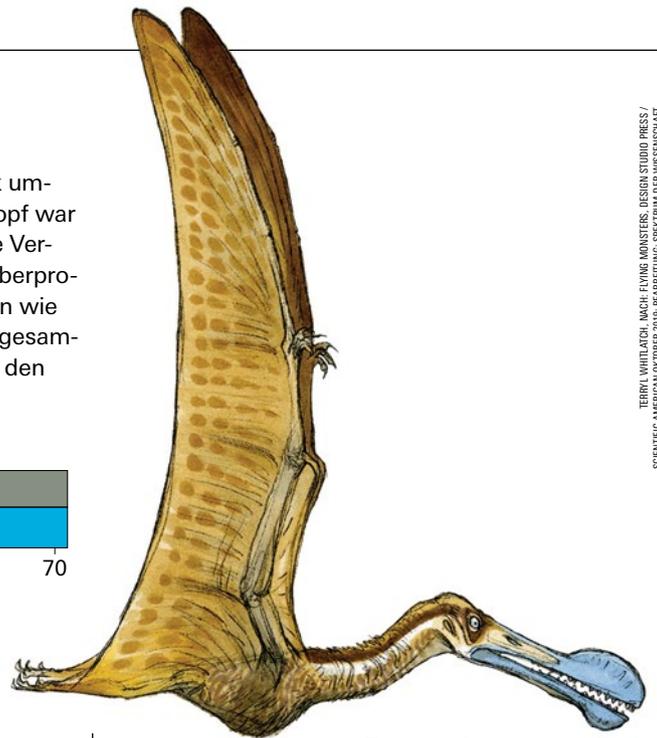
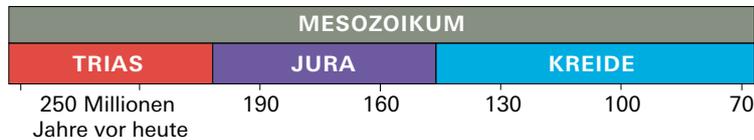
Die Kuriositäten enden damit nicht. Während bei den meisten Tieren einschließlich des Menschen die Halswirbel zu den kleinsten Skelettbestandteilen zählen, waren sie bei den Flugsauriern oftmals die größten. In vielen Fällen hatten sie das doppelte Volumen der Rumpfwirbel. Ein besonders anschauliches Beispiel für diesen Trend liefert einer der jüngsten Zuwächse im Stammbaum der Pterosaurier: 2019 beschrieb ich zusammen mit anderen Forschern Fossilien aus der kanadischen Provinz Alberta. Wir gaben der neuen Art den Namen *Cryodrakon boreas*, was soviel bedeutet wie »frostiger Drache des Nordens« – offiziell eine Referenz an den Fundort, inspiriert aber durch den Drachen Viserion aus der Fernsehserie »Game of Thrones«. Dieses Monster besaß Halswirbel, die fast so lang und doppelt so dick wie die Oberarmknochen waren, also just jene Skelettteile, an denen die meisten Flugmuskeln ansetzten und die es somit erst ermöglichten, das Individuum in der Luft zu halten. Bei anderen Spezies war der Hals dreimal so lang wie der Rumpf, und der Kopf war abermals dreimal so groß, so dass Kopf und Hals zusammen mehr als 75 Prozent der Gesamtlänge des Sauriers ausmachten. Warum besaß ein Tier derart groteske Proportionen? Und wie taugte ein solcher Körperbauplan zum Fliegen?

Die Hypothese des »wenn es einfach wäre, könnte es jeder«

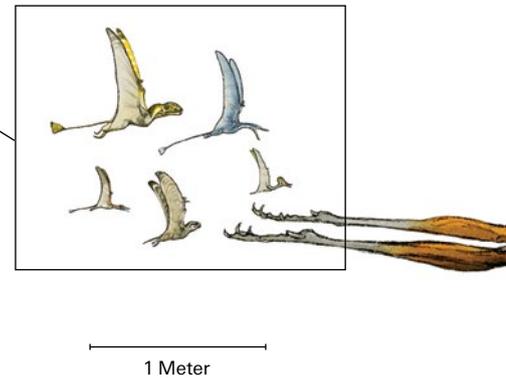
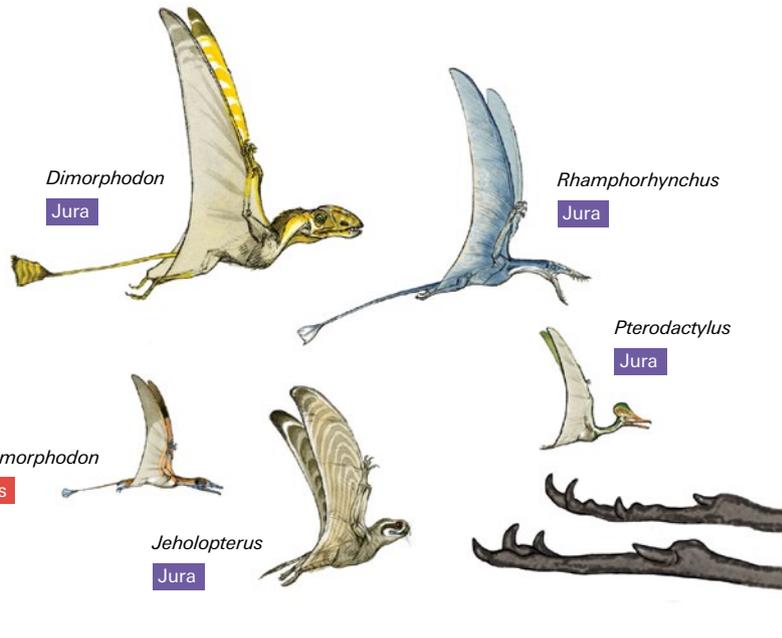
Über die Frage, wie die Flugsaurier zu ihrer aberwitzigen Anatomie gelangten, grübeln die Spezialisten noch immer; eine mögliche Erklärung bezeichne ich als die Hypothese des »wenn es einfach wäre, könnte es jeder«. Kurz gesagt: Eine große Schnauze zum Fressen und eine auffallende Physiognomie als Signal für Paarungspartner und Rivalen wären für viele Tiere erstrebenswert, wenn der dafür notwendige hohe Aufwand dem nicht meist im Weg stünde. Säugetiere besitzen zum Beispiel einen mächtigen Hirnschädel; ihr Kopf müsste bei überdimensionierten Körpern sehr schwer werden. Flugsaurier gerieten vielleicht in eine

Groß und gruselig

Sämtliche Pterosaurier besaßen eigenartige Proportionen. Stark umgestaltete Handknochen dienten als Gerüst für die Flügel, der Kopf war im Verhältnis zum übrigen Körper außerordentlich groß. Spätere Vertreter entwickelten einen noch extremeren Körperbauplan mit überproportional riesigem Kopf. Bei manchen kreidezeitlichen Gattungen wie *Quetzalcoatlus* machten Kopf und Hals mehr als 75 Prozent der gesamten Körperlänge aus. Letztlich dürfte die gewaltige Körpergröße den Reptilien am Ende der Kreide zum Verhängnis geworden sein.



Tropeognathus
Kreide

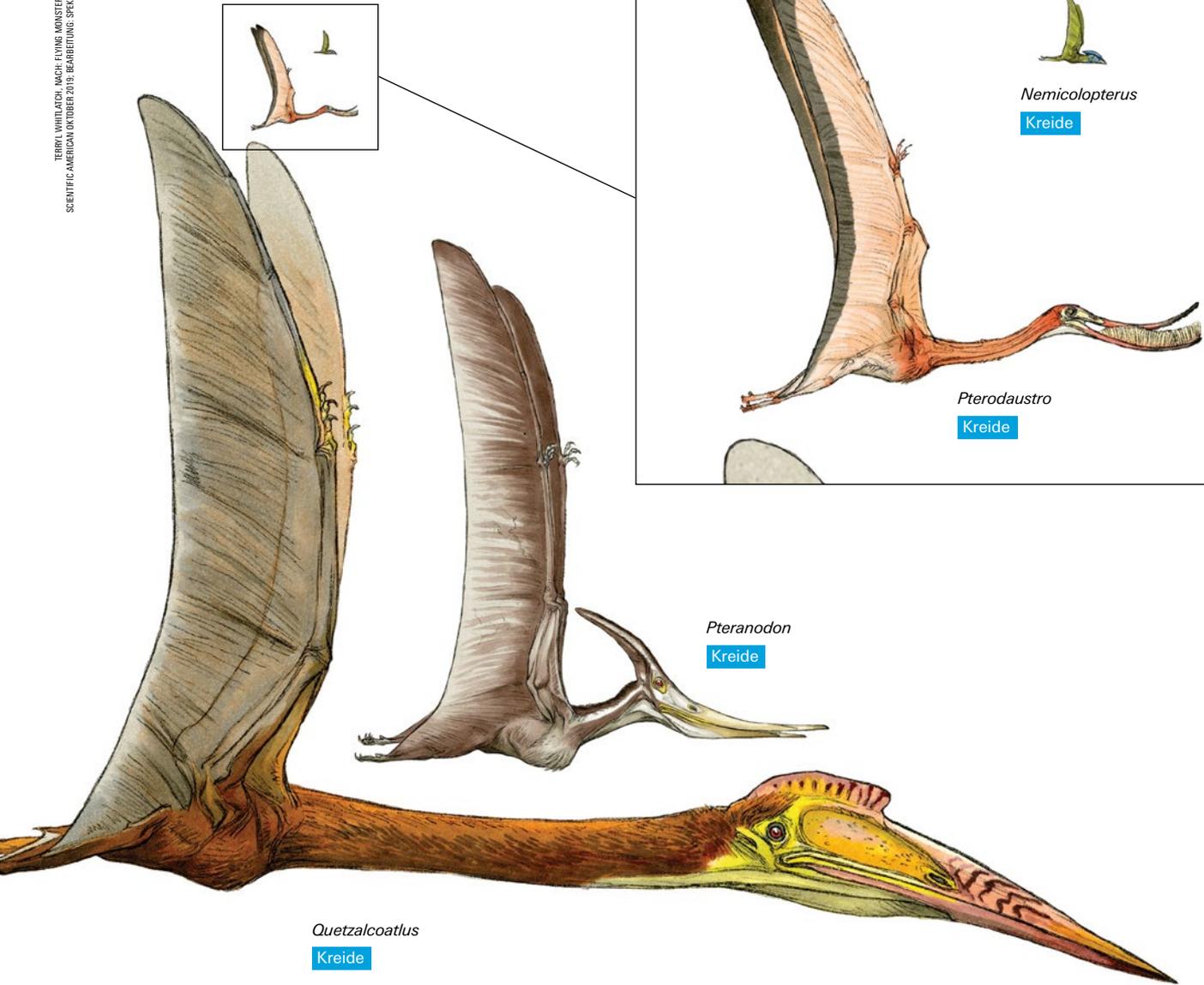


Entwicklungsphase, bei der sich die Gesichtsproportionen von den Abmessungen der Schädelrückseite entkoppelten. Das hätte die Bildung von riesigen Kieferknochen ohne entsprechend mächtigen Hirnschädel ermöglicht.

Außerdem weisen Pterosaurierschädel zusätzliche Öffnungen auf; die größte davon, das Fenestra antorbitalis, lag vor den Augen. Dinosaurier besaßen diese Öffnung ebenfalls, doch bei den Flugsauriern ging die Evolution einen Schritt weiter: Das Loch wurde in manchen Fällen so umfangreich, dass das gesamte Skelett des Rumpfs hinein-gepasst hätte. Bei lebenden Tieren war das Fenster sicher durch Haut und anderes Gewebe verschlossen. Äußerlich fiel es somit kaum auf, aber es machte den Schädel im

Verhältnis zum Volumen recht leicht. Darüber hinaus dürfte es in den Schädelknochen ähnlich wie bei heutigen Vögeln große luftgefüllte Hohlräume gegeben haben.

Trotz solcher Gewichtseinsparungen war der gewaltige Schädel vieler Pterosaurier wohl immer noch ziemlich schwer. Selbst wenn es vielleicht der Intuition widerspricht: Gerade die Tatsache, dass es sich um Flugtiere handelte, könnte ihnen zugutegekommen sein. Das Hauptproblem eines gewichtigen Kopfs liegt nicht in der Zunahme der Gesamtkörpermasse, sondern in seinem unverhältnismäßig hohen Einfluss auf den Körperschwerpunkt. Ein stattlicher Schädel, der dann auch noch auf einem langen Hals sitzt, verlagert den Schwerpunkt weit nach vorn. Für ein am



Quetzalcoatlus
Kreide

Pteranodon
Kreide

Pterodaustro
Kreide

Nemicolopterus
Kreide

Boden laufendes Tier ergibt sich so ein ernstes Problem: Die Vordergliedmaßen müssen sich in eine unbequeme, nach vorn gerichtete Position begeben, um das Individuum im Gleichgewicht zu halten. Die riesigen Vorderextremitäten der Pterosaurier dienen dagegen zum Fliegen.

Als Kevin Padian von der University of California in Berkeley den Gang der Flugsaurier rekonstruierte, wies er nach, dass die Vordergliedmaßen beim Laufen gerade richtig positioniert waren, um das Gewicht von Kopf, Hals und Brustkorb abzufangen. Dabei lieferten die Hinterbeine den größten Teil des Vortriebs. So trugen die Saurier das Gewicht des mächtigen Kopfs mit ihren besonders stämmigen Armen, während sie sich mit ihren eher normal entwi-

ckelten Hinterextremitäten vorwärtsschoben. Stellen Sie sich vor, Sie gehen auf Krücken und belasten dabei Ihre Beine möglichst wenig: Sie setzen beide Krücken gleichzeitig nach vorn und verlagern darauf das gesamte Körpergewicht, um dann Ihre Beine vorwärts zu schwingen und abzusetzen, bevor sich der ganze Vorgang wiederholt. Entsprechend muss auch der Gang der Pterosaurier mit ihren langen Vordergliedmaßen ausgesehen haben.

Auf die Weise zu laufen, mag nicht besonders effizient erscheinen, aber es war praktikabel. Ohnehin bewegten sich die Pterosaurier vorwiegend in der Luft fort. Arten mit besonders langen, schmalen Flügeln ähnlich denen mancher heutiger Seevögel könnten monate- oder sogar jahre-

Auf und davon

Auch die größten Pterosaurier waren eindeutig ans Fliegen angepasst, wogen aber vermutlich über 250 Kilogramm – weit mehr als die größten flugfähigen Vögel, die wir kennen. Wie konnten sich solche Giganten in die Luft erheben? Während Vögel nur auf den Hinterextremitäten laufen und mit ihnen abspringen, gingen Flugsaurier, wie wir von fossilen Spuren wissen, auf allen vieren. Mathematische Modelle deuten darauf hin, dass ein Start aus dem Vierfüßlerstand, bei dem das Individuum sich zuerst mit den Hinter- und dann mit den Vordergliedmaßen abstieß, die zum Abheben erforderliche Sprungkraft lieferte. Die kräftige Flugmuskulatur der Vorderextremitäten konnte so mitgenutzt werden, um die riesigen Tiere in die Luft zu katapultieren.

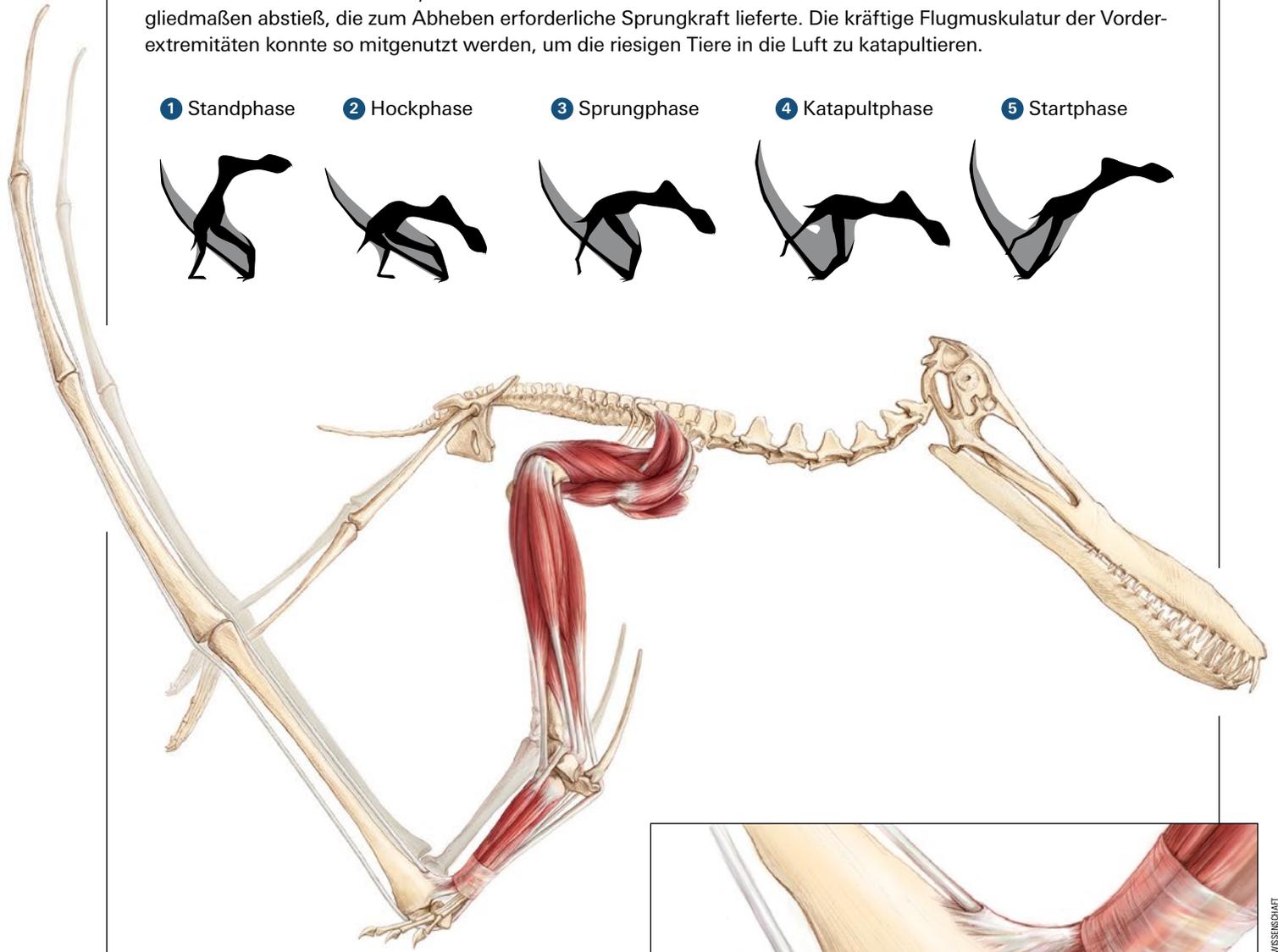
1 Standphase

2 Hockphase

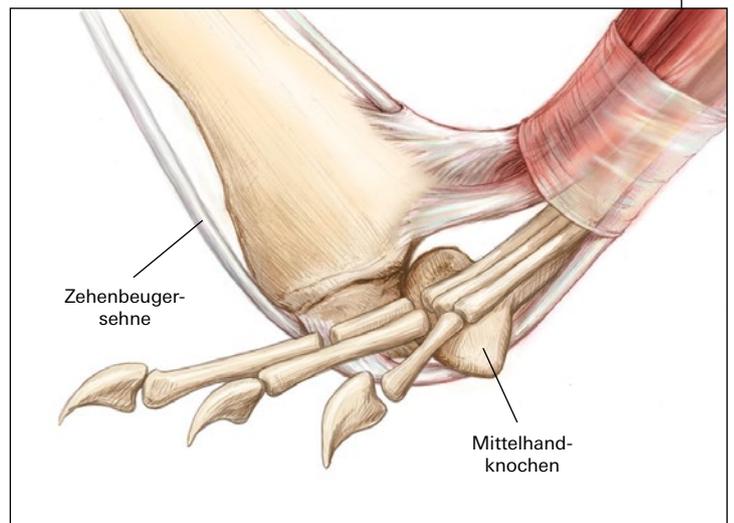
3 Sprungphase

4 Katapultphase

5 Startphase



Die Sehnen und Knochen der Vorderextremitäten fungierten bei den Flugsauriern offensichtlich als Katapultmechanismus. Die Sehne des langen Zehenbeugers (*Musculus flexor digitorum longus*) wurde in der Standphase gegen den Boden (oder bei manchen Arten gegen den dritten Finger) gedrückt. Im Übergang von der Katapult- zur Startphase rutschte sie durch eine Furche im vierten Mittelhandknochen und setzte eine große elastische Energie frei, die dazu beitrug, das Individuum hochzuschleudern.



lang ununterbrochen geflogen sein und landeten vielleicht nur, um sich zu paaren oder Eier zu legen. Die Gattung *Nyctosaurus* besaß wahrscheinlich unter den Wirbeltieren aller Zeiten die leistungsfähigsten Flügel und konnte somit auch am längsten im Gleitflug bleiben.

Im Flug lässt sich das Problem des verschobenen Schwerpunkts viel einfacher bewältigen. Damit sich ein Tier stabil in der Luft halten kann, muss sein Auftriebs- mit dem Masseschwerpunkt übereinstimmen. Das mag bei einem Wesen mit übergroßem Kopf und entsprechend weit vorn liegendem Massezentrum ungünstig erscheinen; der Auftriebsschwerpunkt eines Pterosauriers lag hingegen bei der Flügelvorderseite. Deshalb brauchte das Tier den Flügelansatz nur geringfügig nach vorn abzuwinkeln, um Auftriebs- mit Masseschwerpunkt zur Deckung zu bringen. Nach vorn gekippte Flügel können zwar ihrerseits Instabilitäten hervorrufen, aber deren Biegsamkeit sowie die schnellen, vom Kleinhirn gesteuerten Reflexe, über die jedes Wirbeltier verfügt, dürften das ausgeglichen haben.

Das Ende der Herrschaft

Sieht man von den Schwierigkeiten mit der Stabilität einmal ab, bieten nach vorn gekippte Flügel auch einige wichtige Vorteile. Einerseits stellen dann ihre Spitzen den letzten Teil des Flügels dar, an dem die Strömung abreißen kann. Bei einem Strömungsabriss, der sich typischerweise bei niedriger Geschwindigkeit einstellt, verliert der Flügel plötzlich den Großteil seines Auftriebs. An den Spitzen wirkt sich das besonders katastrophal aus, weil der Sog des Flügels abrupt unterbrochen wird, was Vortrieb und Steuerung stark beeinträchtigt und den Luftwiderstand erhöht. Tritt diese Situation verzögert ein, erfolgen Start und Landung viel sanfter, was gerade für schwere Tiere wichtig ist. Insofern könnte ein riesiger Kopf für ein großes Flugtier mit flexiblen Flügeln sogar günstig erscheinen: Der Schwerpunkt verlagert sich nach vorn, was auch den Flügelschlag vorwärts zieht und den Strömungsabriss unterdrückt. Die Folge: Das Tier kann langsamer fliegen und größer werden.

Etwa 80 Millionen Jahre lang blieben die Pterosaurier die einzigen aktiv fliegenden Wirbeltiere. Dann, im Jura vor rund 150 Millionen Jahren, erhob sich eine zweite Wirbeltiergruppe in die Lüfte: gefiederte Dinosaurier. Unter ihnen waren vierflügelige Wesen wie *Microraptor* und *Anchiornis*, außerdem die versiertesten Flieger aller Zeiten: Vögel. In der frühen Kreidezeit teilte sich eine vielgestaltige Vogelwelt den Himmel mit den Flugsauriern. Obwohl die ökologische Nische der Lüfte damit kräftig aufgemischt wurde, behielten die Pterosaurier unter den mittelgroßen bis großen Flugtieren insbesondere über offenen Lebensräumen die Oberhand. Die Vögel beschränkten sich im Wesentlichen auf stark bewachsene Regionen, wo sie mit ihrer geringen Körpergröße und ihrer Beweglichkeit im Vorteil blieben. Als Herrscher des freien Himmels konnten die Pterosaurier also ihre Stellung behaupten.

Als dann vor 66 Millionen Jahren ein Asteroid auf die Erde stürzte und die Dinosaurier mit Ausnahme der Vögel vernichtete, endete auch die Herrschaft der Flugsaurier. Laut bisherigen Befunden schaffte es keine einzige Pterosaurierart über die Grenze am Ende der Kreidezeit: Alle

gingen zu Grunde – wie auch die Mehrzahl der Vögel. Nur eine einzige Gruppe, die Neornithes oder »neuen Vögel«, überlebte. Doch diese eine Abstammungslinie genügte, um Abertausende neue Arten hervorzubringen und mit heute rund 11000 anerkannten Spezies zur zweitgrößten Wirbeltiergruppe nach den Knochenfischen zu avancieren.

Warum ereilte die Flugsaurier am Ende der Kreide ein schlimmeres Schicksal als die Vögel? Ein Grund könnte in deren schier Größe gelegen haben. Kaum ein Landtier, das ausgewachsen mehr als 20 Kilogramm wog, überlebte jene apokalyptische Phase. Und nicht nur massiv zu sein, sondern auch in der Luft zu leben, dürfte sich doppelt verheerend ausgewirkt haben, denn große Flieger müssen meist gleitend unterwegs sein. Segeln hängt aber von geeigneten Wetterbedingungen ab. Beim Einschlag des Asteroiden verdampfte mit ihm ein Teil der Erdkruste, und als diese höchst energiereiche Wolke aus Gestein und Metall wieder in die Atmosphäre eintrat, setzte sie den Himmel rund um die Welt buchstäblich in Brand. Laut Segelflugexperten könnten nach dem Einschlag weltweit einen Monat lang die Voraussetzungen für Gleitflug gefehlt haben – genug, um alle Pterosaurier, die sich zur Nahrungssuche aufschwingen mussten, verhungern zu lassen.

Einfach nur klein zu sein, genügte jedoch genauso wenig – die meisten Vögel verschwanden ebenfalls. Die Überlebenden begnügten sich wahrscheinlich mit Futter wie Samen, das einen nuklearen Winter überstehen würde. Vielleicht konnten sie sich im Verborgenen aus der Schusslinie retten. Pterosaurier waren anscheinend keine Spezialisten für Samen, und sie verkrochen sich nicht. Wozu auch? Ein fünf Meter großes, Dinosaurier fressendes, fliegendes Ungeheuer muss sich nicht vor Gefahren verstecken – es *ist* die Gefahr.

Obwohl die Karriere der Flugsaurier mit ihrem Aussterben zu Ende ging, bleibt sie eine Erfolgsgeschichte: Die Tiere gelten als Inbegriff von Giganten der Lüfte und erwarben im Lauf ihrer Evolution eine atemberaubende Fülle anatomischer Merkmale, die weder vorher noch nachher bei irgendeiner anderen Gruppe so auftraten. Von ihnen haben wir viel über die Grenzen von Form und Funktion bei Tieren gelernt. Die Fossilien der Pterosaurier eröffnen uns spannende Einblicke in die Geschichte der Erde mit ihrer ökologischen Komplexität und offenbaren uns eine längst vergangene Welt voll fliegender Monster. ◀

QUELLEN

Hone, D.W.E. et al.: *Cryodrakon boreas*, gen. et sp. nov., a late Cretaceous Canadian azhdarchid pterosaur. *Journal of Vertebrate Paleontology* 39, 2019

Witton, M.P., Habib, M.B.: On the size and flight diversity of giant pterosaurs, the use of birds as pterosaur analogues and comments on pterosaur flightlessness. *PLoS One* 5, e13982, 2010

LITERATURTIPP

Ksepka, D.T., Habib, M.: Riesenvögel der Urzeit. *Spektrum der Wissenschaft* 8/2016, S. 18–25

Daniel Ksepka und Michael Habib stellen die Flugkünste ausgestorbener Riesenvögel vor.

TECHNIK WELTREKORD IN DER KRYOELEKTRONEN- MIKROSKOPIE

Forschern ist es gelungen, einzelne Atome durch ein Elektronenmikroskop aufzulösen. Das könnte dabei helfen, die Funktion von Proteinen besser zu verstehen und neue Wirkstoffe zu entwickeln.

Eine Aufnahme des neuartigen Kryoelektronenmikroskops in Göttingen. Die runden Strukturen sind Apoferritin-Moleküle, die Eisenspeicherproteine beim Menschen.

Seit Jahrhunderten entwickeln Forscher optische Instrumente, um Objekte jenseits der Auflösungsgrenze des menschlichen Auges kenntlich zu machen. Dabei arbeiteten sie sich von einfachen bis zu immer leistungsfähigeren Lichtmikroskopen vor. Dadurch gelang es ihnen bereits früh, Objekte im Mikrometerbereich wie Zellen oder Bakterien abzubilden.

Gerade zurzeit spielt die Erforschung von Viren eine große Rolle. Allerdings sind solche organischen Strukturen etwa 1000-fach kleiner als Bakterien und entziehen sich selbst der Leistung modernster Lichtmikroskope. Lange stellten Viren daher äußerst rätselhafte Krankheitserreger dar. Während der Spanischen Grippe zwischen 1914 und 1918 erwies sich das Influenza-A-Virus als fataler Gegner, unter anderem weil man ihn nicht sichtbar machen konnte.

Erst mit der Erfindung des Elektronenmikroskops in den 1930er Jahren durch den späteren Physik-Nobelpreisträger Ernst Ruska kam die Wende. Die neue Technik verschob die Auflösungsgrenze gegenüber der Lichtmikroskopie so weit, dass es dem Mediziner und Bruder von Ernst Ruska, Helmut Ruska, 1938 gelang, Pockenviren abzubilden. Elektronenmikroskope besitzen bis heute ein etwa 1000-fach besseres Auflösungsvermögen als die besten Lichtmikroskope.

Obwohl es sich bei der Elektronenmikroskopie um eine relativ alte Technik handelt, gelangen in den letzten Jahren entscheidende Durchbrüche (siehe »Spektrum« September 2019, S. 66). Inzwischen setzen Wissenschaftler unterschiedlichster Bereiche die Technik routinemäßig ein, um beispielsweise dreidimensionale Strukturen von Proteinen zu untersuchen. Um solche Erfolge zu erzielen, mussten Forscher über Jahrzehnte den technischen Aufbau, die Detektoren sowie die Software für die computergestützte Auswertung der Bilder verbessern. Ausschlaggebend für die Fortschritte war auch die wachsende Rechenleistung von Computern, die nötig ist, um die enormen Datenmengen der mikroskopischen Aufnahmen auszuwerten.

In einem Kryoelektronenmikroskop liegt die Probe in einem Bereich, der üblicherweise durch flüssigen Stickstoff auf Temperaturen von etwa minus 180 Grad Celsius abgekühlt wird. Daraus leitet sich der Name ab, denn das griechische Wort »kryos« bedeutet kalt. Jacques Dubochet, Joachim Frank und Richard Henderson, die maßgebliche Pionierarbeit zu der technischen Entwicklung der Kryoelektronenmikroskopie geleistet haben, erhielten dafür 2017 den Nobelpreis für Chemie.

Zusammen mit meinen Kollegen am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen und in Zusammenarbeit mit Thermo Fisher in Eindhoven und der CEOS GmbH in Heidelberg haben wir nun ein neuartiges Hochleistungs-Kryoelektronenmikroskop aufgebaut, das selbst einzelne Atome in Proteinen sichtbar macht.

Wir haben das Gerät dazu mit einem so genannten Monochromator ausgestattet, der Farbfehler ausgleicht. Weil die im Elektronenmikroskop beschleunigten Teilchen nicht alle die gleiche Geschwindigkeit haben, besitzen sie verschiedene Wellenlängen, die unterschiedlichen Farben entsprechen. Ein Monochromator filtert aus dem Spektrum einen Teil der Elektronen mit nahezu der gleichen Wellenlänge heraus. Damit konnten wir sowohl die Abbildungsqualität als auch die maximal erreichbare Auflösung deutlich erhöhen.

Auflösungsgrenze durchbrochen

Um zusätzliche Bildfehler zu reduzieren, nutzten wir einen sphärischen Aberrationskorrektor. Auf dem Weg durch die Objektivlinse werden parallel einfallende Elektronen nicht wie gewünscht auf einen Punkt fokussiert, sondern auf ein breiteres Scheibchen, worunter die Bildqualität und auch die Auflösung leiden. Das liegt an den unterschiedlichen Ablenkungseigenschaften der Linse, abhängig vom Abstand zum optischen Zentrum. Mit einem Aberrationskorrektor können wir diesen Fehler im Mikroskop vollständig beseitigen und damit die Bildqualität und die maximal erreichbare Auflösung verbessern.

Insgesamt ist es, als hätten wir dem Mikroskop eine Hightech-Brille aufgesetzt. Zeitgleich mit uns gelang es einer britischen Forschungsgruppe unter der Leitung von Sjors Scheres an der University of Cambridge, einzelne Atome in Proteinen abzubilden. Sie arbeiteten mit einem anderen Mikroskop, das einen Energiefilter und einen neuartigen Detektor enthält. Zusammen mit den britischen Kollegen versuchen wir nun, die Hardware aus beiden Mikroskopen zu kombinieren, um noch besser zu werden.

Unsere Forschungsgruppen haben durch unterschiedliche Ansätze erstmals die bisherige Auflösungsgrenze in der Kryoelektronenmikroskopie

Es wirkt wie ein Mikroskop mit Hightech-Brille

durchbrochen. Aus einer Million Bilder des Proteins Apoferritin konstruierten wir eine 3-D-Struktur mit einer Auflösung von 1,15 Ångström, dem zehnmillionsten Teil eines Millimeters. Bislang ließen sich nur die Bausteine eines Proteins, die Aminosäuren, mit der Kryoelektronenmikroskopie visualisieren. Jetzt ist es sogar möglich, die einzelnen Atome der Aminosäuren getrennt voneinander zu erkennen.

Eine solche Auflösung erweist sich für viele Anwendungen als außerordentlich nützlich. Möchte man eine Maschine verstehen, muss man ihre einzelnen Bauteile kennen. Ähnlich verhält es sich mit einer wichtigen Gruppe von Proteinen, den Enzymen. Man kann sie als biologische Nanomaschinen verstehen, die lebensnotwendige biochemische Prozesse ablaufen lassen. Um herauszufinden, wie Enzyme chemische Reaktionen in Zellen katalysieren, muss man wissen, wo sich die einzelnen Atome der entsprechenden Aminosäuren befinden. Eine entscheidende Rolle in der Proteinaktivität spielen zudem die Wasserstoffatome, die sich wegen ihrer geringen Größe extrem schwer visualisieren lassen. In katalytisch aktiven

Enzymen bilden sich Netzwerke aus Wasserstoffatomen, ohne die keine chemischen Reaktionen stattfinden könnten. Mit der Kryoelektronenmikroskopie haben wir nun ein Auflösungs-niveau erreicht, das es erstmals erlaubt, diese Atome abzubilden.

Damit ließe sich die Technik nun auch bei der Medikamentenentwicklung einsetzen. Um einen neuen Wirkstoff zu finden, muss man bestimmte Fehlfunktionen von Proteinen beheben, auf denen Krankheiten beruhen. Dazu synthetisieren Forscher organische Moleküle, die sich an die betreffenden Proteine binden und deren Funktion beeinflussen. Allerdings muss man dafür möglichst genau wissen, wie die Stoffe auf atomarer Ebene miteinander wechsel-

wirken. Wenn bekannt ist, wo sich die Atome im Protein befinden, inklusive daran gebundener Wassermoleküle und Ionen, lässt sich die Effektivität der Wirkstoffe optimieren.

Noch vor einigen Jahrzehnten hätte niemand derartige Fortschritte für möglich gehalten. Anfang des letzten Jahrhunderts hatte Ruska sogar größte Schwierigkeiten, Forschungsmittel zu erhalten, um die damals noch junge Technik weiterzuentwickeln. Die meisten Wissenschaftler gingen zu dieser Zeit davon aus, es gäbe in der Biologie jenseits der Auflösungsgrenze der Lichtmikroskope nichts zu entdecken. Zudem fragten sie sich, wie man organische Objekte mit einem Elektronenmikroskop abbilden könnte, ohne sie durch den Elektronenstrahl zu

zerstören. Doch Ruska zeigte sich hartnäckig und ließ sich von derlei Kritik nicht beeinflussen, frei nach seinem Motto: »Manchmal ist es in der Wissenschaft besser, Mut zu haben, als gescheit zu sein.« Ruska wäre heute wohl mehr als überrascht, wie weit es seine Erfindung gebracht hat.

Holger Stark leitet die Abteilung Strukturelle Dynamik am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen.

QUELLEN

Scheres, S.H.W. et al.: Single-particle cryo-EM at atomic resolution. *BioRxiv* 2020.05.22.110189, 2020

Stark, H. et al.: Breaking the next Cryo-EM resolution barrier – atomic resolution determination of proteins! *BioRxiv* 2020.05.21.106740, 2020

PALÄOANTHROPOLOGIE *HOMO SAPIENS* KAM NOCH FRÜHER NACH EUROPA

Bereits vor rund 45 000 Jahren hatte der anatomisch moderne Mensch Europa erreicht, wie Funde aus Bulgarien belegen. Und womöglich lernten die Neandertaler von den Neuankömmlingen.

Einige hunderttausend Jahre lang streiften die Neandertaler und ihre Vorfahren konkurrenzlos durch Europa. In wärmeren Epochen jagten sie Pferde, Hirsche und andere Tiere – selbst in nördlichen Gefilden dieses Kontinents. Und rückten die Gletscher der Eiszeit nach Süden vor, zogen sie sich in mildere Regionen zurück. Erst als anatomisch moderne Menschen in Europa auftauchten, schien sich das Blatt zu wenden. Vor rund 40 000 Jahren waren die Neandertaler dann verschwunden.

Welche Rolle die Neuankömmlinge beim Untergang der robust gebauten Frühmenschen spielten, sorgt seit Langem für Diskussionen. Zumal bisher nicht genau bekannt war, wann überhaupt der erste *Homo sapiens* Europa erreicht hatte. Ebenso war unklar, wie lange sich die anatomisch

modernen Menschen und die Neandertaler den europäischen Kontinent teilten. Neue Funde aus Bulgarien liefern nun Antworten auf diese Fragen. Jean-Jacques Hublin und Helen Fewlass vom Leipziger Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie (EVA) haben zusammen mit ihren Kollegen in zwei Studien aktuelle Erkenntnisse zu jener Phase der Altsteinzeit veröffentlicht. Dabei spielt auch eine Rolle, dass Experten jüngst die altbewährte C-14-Methode zur Altersbestimmung neu geeicht haben. Die Arbeitsgruppe IntCal um Paula J. Reimer von der Queen's University Belfast hat 2020 eine korrigierte Kalibrierungskurve für die nördliche Hemisphäre präsentiert, die IntCal20. Besonders für die Zeit zwischen 48 000 und 40 000 Jahren vor heute haben sie bisherige Datierungen aktualisiert.

Das Ergebnis all dieser Forschungen: In der bulgarischen Bacho-Kiro-Höhle lebten bereits vor rund 45 000 Jahren moderne Menschen. Demnach waren sie möglicherweise 5 000 Jahre früher als bisher angenommen nach Europa gelangt. Der zuvor älteste Nachweis für die Ankunft von *Homo sapiens* stammte aus einer Höhle in Rumänien – ein zirka 40 000 Jahre alter Unterkiefer aus der Peștera cu Oase. Zwar gibt es in Großbritannien eine frühere Fundstätte, die etwa 43 000 Jahre alt sein könnte, und eine in Italien mit einem Alter von rund 44 000 Jahren, aber beide Datierungen stehen auf wackeligen Füßen und sind in der paläoanthropologischen Forschung umstritten.

In der Bacho-Kiro-Höhle hatten Ausgräber bereits zwischen 1971 und 1975 Knochen von Menschen gefunden. Die Stücke gingen allerdings verloren. Obendrein hatten Altersbestimmungen widersprüchliche Daten ergeben. Daher haben Jean-Jacques Hublin und seine Kollegen gemeinsam mit Archäologen der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften 2015 begonnen, in der Höhle zu graben, die in den nördlichen Ausläufern des Balkangebirges liegt.

Nahe dem Felsengrund der Höhle stießen die Forscher auf eine dunkle Erdlage, in der sie rund 14 000 Kno-

Bosporus nach Europa gekommen«, vermutet Michael Petraglia, der auf die Geschichte des anatomisch modernen Menschen in Indien, Teilen Südasiens und Afrika spezialisiert ist. »Da Klimaveränderungen die Wüsten immer wieder ergrünen ließen, könnten in diesen Zeiten moderne Menschen aus Afrika nach Europa und Asien gewandert sein«, sagt der Paläoforscher.

Nicht alle Einwanderer überlebten in der neuen Heimat oder setzten sich zumindest nicht genetisch durch, wie wohl jene aus der Bacho-Kiro-Höhle. Offenbar waren andere Gruppen erfolgreicher gewesen, die Jahrtausende später aus Afrika nach Europa kamen. Sie brachten ein anderes Gensignal mit. »Es ist durchaus möglich, dass sich die wenigen Alteingesessenen zwar mit den Nachzüglermischten, ihr Erbguttyp jedoch nach etlichen Generationen aus der gesamten Gruppe verschwunden war«, erklärt Petraglia.

Die Mitbringsel der Vorhut

Die Migranten von vor 45 000 Jahren hinterließen auf dem neuen Kontinent zwar nicht ihren genetischen Fingerabdruck, dafür brachten sie neue Kulturtechniken mit. So fanden die Ausgräber in der Bacho-Kiro-Höhle sehr viele Steinspitzen und Klingen, die für die Jagd oder zum Entbeinen der Beute verwendet wurden. Den hochwertigen Feuerstein für diese Geräte hatten die Menschen aus der Region Ludogorie geholt, ungefähr 180 Kilometer nordöstlich von Bacho-Kiro. Sie bearbeiteten den Flint mit einer Schlagtechnik, die Archäologen bereits von altsteinzeitlichen Lagerplätzen in der Levante und Vorderasien kennen. Die Funde aus Bulgarien belegen nun die älteste bekannte Nutzung in Europa.

Wenige Generationen später tauchten gleichartig gefertigte Werkzeuge in weiten Teilen Eurasiens auf – von Mitteleuropa bis in die Mongolei und nach Sibirien. Offensichtlich hatte *Homo sapiens* also seinen Siegeszug gen Norden von mindestens 45 000 Jahren begonnen. Und möglicherweise fiel der Startschuss sogar schon früher: Jean-Jacques Hublin und seine Kollegen haben in der älteren Schicht

der Bacho-Kiro-Höhle Hinweise darauf gefunden, dass die erste Welle der Neuankömmlinge bereits vor 47 000 Jahren nach Europa gelangt sein könnte. Allerdings lässt sich diese Fundschicht nicht eindeutig von der jüngeren, darüberliegenden trennen. Ob die Einwanderer also tatsächlich 2000 Jahre früher da waren, ist noch unklar.

Rund 7000 Jahre später waren die letzten Neandertaler ausgestorben. »Bis dahin waren sie offenbar etliche Male auf moderne Menschen gestoßen«, sagt Michael Petraglia. Dafür gibt es auch eindeutige Belege. So fanden Kletterer in der Peștera cu Oase in Rumänien 2002 den Unterkiefer eines *Homo sapiens*, aus dem EVA-Forscher Svante Pääbo und seine Kollegen 2015 die Zellkern-DNA isolieren konnten.

Ihr Ergebnis war eine kleine Sensation: Zu den Vorfahren dieses Menschen, ungefähr vier bis sechs Generationen zuvor, gehörte ein Neandertaler. Der Unterkiefer wird auf ein Alter von zirka 40 000 Jahren datiert, allerdings noch nicht mit der präzisen Radiokarbondatierung von Lukas Wacker. Unabhängig davon belegt der Fund, dass sich Neandertaler und moderne Menschen vermischt hatten.

Aber nicht nur das: Die Neandertaler scheinen auch von den Neuankömmlingen gelernt zu haben. So deuten jedenfalls Jean-Jacques Hublin

und seine Kollegen die Fundsituation. In der 45 000 Jahre alten »Schicht I« der Bacho-Kiro-Höhle fanden sie Anhänger, die moderne Menschen damals aus den Zähnen eines Höhlenbären gefertigt hatten. Verblüffend ähnlichen Schmuck schätzten die Bewohner der Grotte du Renne, die vor knapp 41 000 Jahren im Herzen des heutigen Frankreichs lebten. Jean-Jacques Hublin und Frido Welker haben bereits 2016 die damaligen Bewohner als Neandertaler identifiziert. In den Jahrtausenden, in denen beide Menschenformen nebeneinander in Europa lebten, hatten die Ureinwohner also womöglich die Idee von modernen Menschen übernommen, sich mit solchen Bärenzahn-Anhängern zu schmücken. Warum genau die Neandertaler dann aber vor 40 000 Jahren verschwanden, bleibt weiterhin ein Rätsel.

Roland Knauer ist Wissenschaftsjournalist in Lehnin.

QUELLEN

Bard, E. et al.: Extended dilation of the radiocarbon time scale between 40,000 and 48,000 y BP and the overlap between Neanderthals and *Homo sapiens*. PNAS 117, 2020

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

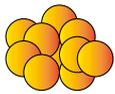
Hublin, J.-J. et al.: Initial Upper Palaeolithic *Homo sapiens* from Bacho Kiro Cave, Bulgaria. Nature 581, 2020

MATERIALWISSENSCHAFTEN VERFLOCHTENE TEILCHEN

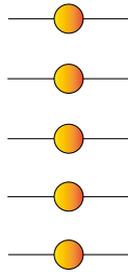
Physikern ist es nach Jahrzehnten gelungen, extrem seltsame Teilchen nachzuweisen, die eine Art Gedächtnis besitzen: Vergangene Bewegungen lassen sich von ihrem Quantenzustand ablesen. Damit könnten sie Quantencomputer revolutionieren.

▶ Stellen Sie sich drei identische Tischtennisbälle vor, die eine Person blitzschnell mehrmals miteinander vertauscht. Es erscheint unmöglich, die genaue Bewegung jedes einzelnen Balls ohne technische Hilfsmittel im Nachhinein nachzuvollziehen. Bei Elementarteilchen ist das

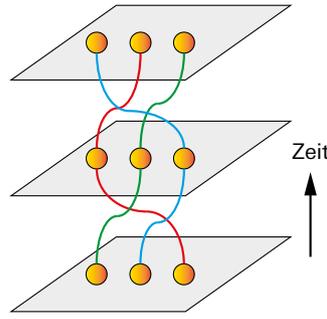
allerdings grundlegend anders, denn die quantenmechanische Wellenfunktion hat ungewöhnliche Eigenschaften: Vertauscht man beispielsweise zwei Elektronen, äußert sich das mathematisch durch ein Minuszeichen in der Wellenfunktion. Wiederholt man das Experiment mit



Bosonen



Fermionen



Anyonen

Während Bosonen dazu neigen, sich zu sammeln, meiden sich Fermionen. Anyonen hingegen besitzen eine Art Gedächtnis, wodurch sich nachvollziehen lässt, wie sie sich durch Raum und Zeit bewegen.

anderen Partikeln wie Photonen, bleibt deren Welle hingegen gleich.

Auf diese Weise lassen sich alle Elementarteilchen und zusammengesetzte Partikel wie Protonen, Neutronen oder sogar ganze Atome in zwei Klassen einteilen: Bosonen, deren Wellenfunktion durch Vertauschungen

stets unverändert bleibt, und Fermionen, bei denen ein Vorzeichenwechsel stattfindet. Zur ersten Klasse gehören sämtliche kräfteübertragenden Elementarteilchen wie Photonen, W- und Z-Bosonen oder Gluonen, während Partikel wie Quarks, Elektronen oder Neutrinos Fermionen sind.

Bereits 1977 stellten Jon Magne Leinaas und Jan Myrheim an der Universität Oslo fest, dass es in zwei Dimensionen Teilchen geben könnte, die völlig anders sind. Sie würden damit eine dritte Klasse bilden: so genannte Anyonen. Vertauscht man zwei derartige Exoten, äußert sich das mathematisch durch eine Drehung der Wellenfunktion. Das heißt, die Bewegung mehrerer Anyonen ist in ihrer Wellenfunktion codiert, so als würden die einzelnen Teilchen eine Schnur hinter sich herziehen, die man mit den jeweils anderen verflechtet. Das verleiht ihnen eine Art Gedächtnis.

Sollten solche Teilchen wirklich existieren, würde das allerlei spannende Anwendungen ermöglichen. Unter anderem ließen sich dadurch neuartige Quantencomputer realisieren, bei denen die Vertauschungen von Anyonen bestimmten Berechnungsschritten entsprechen. Weil es dabei nicht entscheidend ist, wel-

30. Januar 2021
Zürich

Spektrum LIVE
Veranstaltungen des Verlags
Spektrum der Wissenschaft

WELTRAUMSIMULATOR UND VORTRAG

B777-Flug- und Space-Simulator und Vortrag

Seien Sie einmal selbst Pilot und Astronaut und fliegen Sie im B777-Flugsimulator, und/oder erforschen Sie im Space-Simulator Galaxien, Sternennebel und Planeten. Genießen Sie einen spannenden Vortrag zum Thema »Risk Management im Cockpit« sowie ein Apéro Catering, nehmen Sie an einem Wettbewerb teil und tauschen Sie sich mit einem aktiven B777-Kapitän in fachkundigen Gesprächen aus.

Spektrum-Live-Veranstaltung in Kooperation mit Fly & Race Simulations GmbH

Infos und Anmeldung:
Spektrum.de/live

chem Weg genau die Teilchen folgen, wären solche Geräte wesentlich robuster als aktuelle Quantencomputer. Äußere Störungen wie leichte Temperaturschwankungen können den Wellenfunktionen von Anyonen nämlich nichts anhaben.

Deshalb suchen Physiker bereits seit den 1980er Jahren nach den mysteriösen Teilchen – und stießen schnell auf erste Spuren. Ein eindeutiger Nachweis, der die Existenz von Anyonen zweifelsfrei belegt, blieb allerdings aus. Stets ließen sich die ungewöhnlichen Eigenschaften, die Forscher im Experiment verzeichneten, auch anders erklären. Doch nun haben Physiker um Michael Manfra von der Purdue University in West Lafayette, Indiana, eine noch nicht begutachtete Arbeit veröffentlicht, in der sie die Existenz von Anyonen erstmals bestätigen. Dafür untersuchten sie das Hauptmerkmal der Teilchen: ihr ungewöhnliches Tauschverhalten.

»Die Arbeit ist absolut überzeugend«, äußert der Physik-Nobelpreisträger Frank Wilczek vom Massachusetts Institute of Technology, der den Ausdruck »Anyon« in den 1980er Jahren einführte. Zwar vermuten theoretische Physiker schon lange, dass die Teilchen existieren, »sie nun wirklich zu sehen, bringt das aber auf eine ganz andere Ebene«, sagt er.

In zwei Dimensionen gefangen

Weil Anyonen bloß in zwei Raumdimensionen auftreten können, handelt es sich dabei nicht um gewöhnliche Elementarteilchen, die man in der Natur beobachten kann. Wie Wissenschaftler jedoch schnell erkannten, könnten bestimmte Festkörper einen Platz für die mysteriösen Partikel bieten.

Um Materialien zu beschreiben, die aus Abermilliarden von verschiedenen, miteinander wechselwirkenden Teilchen bestehen, greifen Physiker meist auf einen Trick zurück. Ähnlich wie sich eine La-Ola-Welle in Wirklichkeit aus etlichen einzelnen Personen zusammensetzt, kann man sich auch von Festkörpern ein übergeordnetes Bild machen: Man betrachtet kollekti-

ve Anregungen mehrerer Teilchen, die sich wie ein einzelnes Partikel verhalten, ein so genanntes Quasiteilchen. Diese können dabei extrem seltsame Eigenschaften an den Tag legen: Einige wirken, als seien sie masselos, andere wiederum, als hätten sie einen einzigen magnetischen Pol – was bei echten Teilchen unmöglich ist.

Wie theoretische Physiker vorher sagten, könnten sich die Elektronen bestimmter Materialien so zusammenfinden, dass sie die mysteriösen Anyonen bilden. Die entsprechenden Festkörper müssten die Teilchen dafür in eine zweidimensionale Ebene sperren, zudem bräuchte man extrem starke äußere Magnetfelder.

Manfra und seine Kollegen fertigten dazu ein Material aus Galliumarsenid und Aluminium-Galliumarsenid an, das sie auf ein zehntausendstel Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt von $-273,15$ Grad Celsius abkühlten. Als sie zusätzlich ein starkes äußeres Magnetfeld einschalteten und das Material an eine Stromquelle anschlossen, geschah etwas Ungewöhnliches: Im Inneren des Festkörpers floss wie bei einem normalen Isolator kein Strom, während sein Rand extrem gut leitete. Der Zustand erinnert an den so genannten Quanten-Hall-Effekt (siehe »Spektrum« Februar 2019, S. 50). Allerdings tragen im Unterschied zu diesem die Quasiteilchen, die entlang des Rands fließen, nur einen Bruchteil der Elektronenladung. Das Phänomen ist als fraktionaler Quanten-Hall-Effekt bekannt. Wissenschaftler mutmaßen schon lange, die dabei auftretenden Quasiteilchen könnten Anyonen entsprechen.

Manfra und sein Team bearbeiteten das Material, damit zwei verschiedene Wege entstanden, entlang derer die beweglichen Quasiteilchen durch den Stoff fließen konnten. Am Ende vereinigten sich die Pfade wieder, so dass die Forscher ein elektrisches Signal registrierten, das sich aus den zusammen treffenden Teilchen ergab. Indem die Physiker das äußere Magnetfeld und die elektrische Spannung variierten, veränderte sich Berechnungen zufolge die Anzahl der im Inneren befindlichen, statischen Anyonen. Die

beweglichen Quasiteilchen am Rand des Materials umrundeten daher entlang der Wege eine unterschiedliche Menge von statischen Anyonen im Inneren – was sich in ihrer Wellenfunktion bemerkbar machte. Trafen die Teilchen beider Pfade wieder zusammen, überlagerten sich ihre Wellenfunktionen, wodurch wie bei gewöhnlichen Wellen ein Interferenzmuster entstand, das Manfra und seine Kollegen registrierten. Ihre Ergebnisse deckten sich dabei genau mit den Vorhersagen theoretischer Berechnungen für Anyonen.

Der Grundstein für eine neue Art Quantencomputer

Anders als bisherige Arbeiten, die ebenfalls Hinweise auf die seltsamen Teilchen lieferten, lassen die Resultate aus Indiana keine alternative Interpretation zu. »Ich wüsste nicht, wie man das Experiment anders erklären sollte«, sagt der theoretische Festkörperphysiker Bernd Rosenow von der Universität Leipzig.

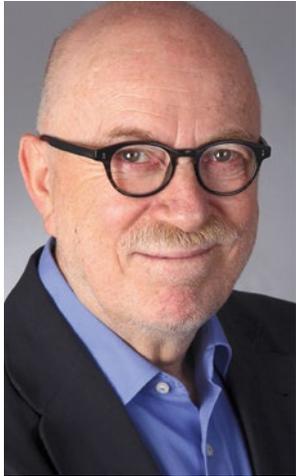
Damit haben Manfra und seine Kollegen den Grundstein für eine neue Art von Quantencomputern gelegt, die Anyonen für ihre Berechnungen nutzen könnten. Die Quasiteilchen ihres Experiments würden sich dafür allerdings nicht eignen. Deshalb arbeiten die Physiker gerade an einem komplizierteren Versuchsaufbau, der passende Anyonen hervorbringen soll. Dennoch liegen derartige Quantencomputer noch in weiter Ferne: Auch wenn große Firmen wie Microsoft ihre Hoffnungen darauf setzen, war bis vor Kurzem noch gar nicht klar, ob Anyonen überhaupt existieren – geschweige denn, wie sich daraus ein Qubit erzeugen lässt.

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

QUELLEN

Nakamura, J. et al.: Direct observation of anyonic braiding statistics at the $\nu=1/3$ fractional quantum Hall state. ArXiv 2006.14115, 2020

Wilczek, F.: Quantum mechanics of fractional-spin particles. Physical Review Letters 49, 1982



SPRINGER'S EINWÜRFE TUT DIE PANDEMIE DER UMWELT GUT?

Auf den ersten Blick bringen uns die virusbedingten Einschränkungen der Wirtschaft den globalen Klimazielen näher. Doch das Gegenteil ist der Fall.

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/1773729

Als angehender Physiker, lange ist es her, konnte ich der erstarkenden Ökobilogik herzlich wenig abgewinnen. Mir widerstrebte, wie dort Wissenschaft und Technik oft als direkte Gefahr für die Umwelt abgestempelt wurden. Den Slogan »Small is beautiful« fand ich albern, und wenn ich später dennoch gegen Umweltzerstörung mitdemonstrierte, brachte ich es nicht über mich, bei »Karl der Käfer« wurde nicht gefragt / Man hat ihn einfach fortgejagt« allen Ernstes mitzusingen.

Selbst heute empfinde ich keine Genugtuung darüber, dass infolge der diversen Lockdowns wegen der Corona-Pandemie nicht so viel geflogen und gefahren sowie weniger produziert wird. Damit sinkt zwar in den hoch industrialisierten Ländern momentan die Umweltbelastung, aber das bloße Einschränken von Produktion und Verkehr bei gleich bleibendem Stand der weitgehend fossilen Technik kann kaum eine dauerhafte Lösung für die globalen Klimaprobleme sein – höchstens eine vorübergehende Atempause.

Tatsächlich droht der Umwelt langfristig immenser Schaden, falls die Lieferketten, auf denen bislang innovative Energieträger und CO₂-arme Technologien in alle Welt gelangen konnten, durch die Pandemie zusammenbrechen. Davor warnen mit guten Gründen die Politologen Andreas Goldthau von der Universität Erfurt und Llewelyn Hughes von der Australian National University in Canberra (*Nature* 585, S. 28–30, 2020).

Wie die Autoren zeigen, hat sich im vergangenen Jahrzehnt eine ökologisch äußerst vorteilhafte internationale Arbeitsteilung etabliert. So dominieren chinesische Firmen zwar den Fotovoltaikmarkt, beziehen aber die Maschinen zur Herstellung von Siliziumscheiben und Solarzellen aus Deutschland. Dadurch sanken die Preise für Solarmodule binnen zehn Jahren um 90 Prozent, und entsprechend fielen weltweit auch die Kosten der solaren Stromerzeugung. Ähnliches gilt –

bei anders gelagerten Lieferketten – für Windräder, Lithium-Batterien und Elektroautos.

Doch nun, im Zeichen von Covid-19, versuchen mehrere Regierungen die Globalisierung zurückzudrehen. Vor allem die USA unter Donald Trump hatten schon vorher begonnen, China durch protektionistische Maßnahmen aus bestehenden Handelsnetzen zu schubsen, um es durch »vertrauenswürdige« Partner wie Australien, Japan, Neuseeland und Südkorea zu ersetzen. Allerdings wird es kaum gelingen, China wirtschaftlich so konsequent zu isolieren, wie es in der Ära des Kalten Kriegs mit der Sowjetunion geschehen ist, denn die Verflechtung Chinas mit der Weltwirtschaft, nicht zuletzt mit den USA, ist viel enger als seinerzeit die des Ostblocks mit dem Westen.

Jedenfalls kosten derlei politisch motivierte Produktionsverlagerungen enorm viel Zeit und Geld, die besser für den schnelleren Ausbau sauberer Energien verwendet wären. Denn wie Goldthau und Hughes betonen, drängt die Zeit. Um das von fast allen Staaten der Erde erklärte Ziel einer Erderwärmung unter zwei Grad zu erreichen, müssen die CO₂-Emissionen im kommenden Jahrzehnt um acht Prozent pro Jahr sinken. Das werden sämtliche Corona-Lockdowns nicht im Entferntesten bewerkstelligen, und jede politisch motivierte Zollschanke gegen die global vernetzten Lieferketten rückt das schon für 2050 angepeilte Ziel einer CO₂-neutralen Weltwirtschaft nur in noch weitere Ferne.

Um das Zwei-Grad-Klimaziel zu erreichen, ist die pandemiebedingte Drosselung der Wirtschaft bei gleichzeitig isolationistischer Kirchturmpolitik jedenfalls der verkehrte Weg. Gefragt ist eine meinetswegen »grüne« Industriepolitik, die international abgestimmt in großem Stil umweltfreundliche Technologien entwickelt. Small is beautiful? Im Gegenteil: je größer, desto besser.



MEDIZINGESCHICHTE VON CHOLERA BIS CORONA

Was machen Pandemien mit unserer Gesellschaft? Historisch betrachtet trieben sie stets den Ausbau der öffentlichen Gesundheitssicherung voran. Heute greifen wir auf die dabei entstandenen Institutionen zurück.



HEIKO GRAMMEL



ANDREAS BRETZ

Heiner Fangerau (links) ist Professor für Geschichte, Theorie und Ethik der Medizin an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. **Alfons Labisch** bekleidete ebenda bis 2015 eine Professur für Geschichte der Medizin und ist heute Distinguished Professor for the History of Science and Medicine an der Beijing Foreign Studies University.

► [spektrum.de/artikel/1773708](https://www.spektrum.de/artikel/1773708)

Die aktuelle Covid-19-Pandemie, verursacht vom Virus Sars-CoV-2, beeinflusst das gesellschaftliche und soziale Leben weltweit in außerordentlichem Maße. Da es noch keine breit verfügbare, wirksame Impfung gegen den Erreger gibt und die Mechanismen der Erkrankung nur zum Teil geklärt sind, setzen Mediziner und Gesundheitspolitiker vor allem auf indirekte Maßnahmen zur Eindämmung. Dazu zählen Kontaktbeschränkungen, Versammlungsverbote oder Maskenpflicht. Schon früh herrschte weitgehend Einigkeit, die Beschränkung sozialer Kontakte sei der richtige Weg, um die Ausbreitung des Virus zumindest so weit zu verlangsamen, dass die medizinischen Infrastrukturen alle ernsthaft Erkrankten auffangen und versorgen können. Wenig später begann allerdings die Stimmung in Teilen der Bevölkerung zu kippen; es machte und macht sich weiterhin Kritik an den seuchenpolitischen Maßnahmen und den dadurch bedingten Freiheitseinschränkungen breit, die nicht als reines Störgeräusch von Verschwörungstheoretikern abgetan werden kann. Da stellt sich unter anderem die Frage, wie die Menschen früher mit Pandemien umgegangen sind – und was daraus zu lernen ist.

Mit Gesichtsmasken gegen die Influenza: Während der Spanischen Grippe, die von 1918 bis 1920 wütete, versuchte sich dieses Paar mit Mund-Nase-Bedeckungen vor einer Ansteckung zu schützen. Eine Therapie, die gezielt den Erreger bekämpfte, gab es nicht.

Zwar ist Covid-19 fraglos ein neues Phänomen, und unsere Gesellschaft geht die damit verbundenen Herausforderungen mit moderner Technik an, die früher nicht zur Verfügung stand – man denke nur an Homeoffice, Home-Schooling und die Corona-Warn-App. Doch die Debatten selbst, der Streit über das richtige Handeln angesichts beschränkten Wissens sowie das Gerangel um die medizinischen und politischen Weichenstellungen hat es in ähnlicher Form bereits bei früheren Epidemien gegeben.

Zu den recht gut dokumentierten Pandemien gehört die Cholera, die sich im Zuge der Industrialisierung und vor

AUF EINEN BLICK EPIDEMIEN IM WANDEL DER ZEIT

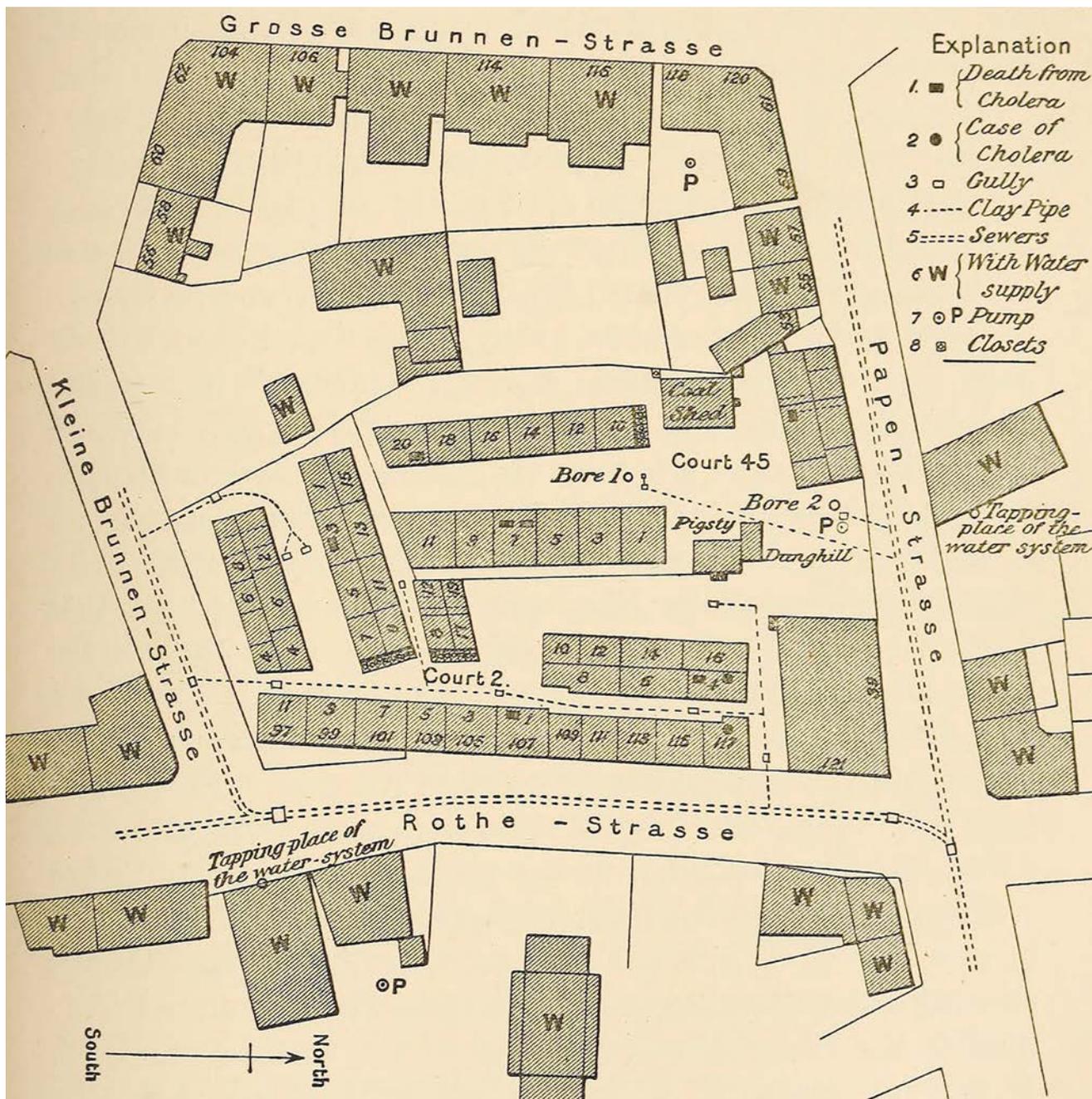
- 1** Pandemien wie Covid-19 sind im Zuge weltumspannender Verkehrs- und Warenströme wahrscheinlicher geworden.
- 2** Zu den globalen Epidemien der jüngeren Vergangenheit zählen die Cholera und die Spanische Grippe.
- 3** Seuchen wie diese haben maßgeblich dazu beigetragen, öffentliche Gesundheit als Wert zu erkennen und institutionell zu fördern. Ein Ergebnis dessen ist die Weltgesundheitsorganisation.

allein der Ausbreitung städtischer Lebensformen in den damaligen Industriestaaten verbreitete. Die bakterielle Infektionskrankheit erreichte 1830 erstmals Europa und löste im Lauf des 19. Jahrhunderts mehrere Pandemien aus. Sie beschleunigte eine Entwicklung, die schon zuvor eingesetzt hatte, nämlich dass Gesundheit von staatlicher Seite einen »öffentlichen Werth« (Lorenz von Stein, 1815–1890)

Ein 1895 in Amerika erschienenes Buch bildete diese Grafik ab, mit deren Hilfe der Mediziner Robert Koch einen Choleraausbruch 1892 in Hamburg analysierte. Eingezeichnet sind Wasserleitungen, Straßen, Gebäude, Höfe und Wasserpumpen in einem Hamburger Stadtteil.

zugesprochen bekam und staatliche Institutionen versuchten, eine umfassende Gesundheitssicherung einzurichten. In diesem Zusammenhang formulierten Naturwissenschaftler damals das Konzept einer geschlossenen Hygiene, die vor allem am Lebensumfeld der Menschen ansetzte.

Der führende Vertreter dieser Umgebungs- oder Konditionalhygiene in Deutschland war Max von Pettenkofer (1818–1901), der erste deutsche Professor für Hygiene. Seine thematisch und methodisch äußerst vielfältigen Arbeiten wurden wesentlich durch die Choleraepidemien der 1850er Jahre vorangetrieben. Pettenkofer durchleuchtete mit chemischen und physiologischen, später auch technischen und statistischen Methoden sämtliche Verhältnisse, die sich auf die Gesundheit und das Leben der Menschen auswirken können: Ernährung, Kleidung, Heizung, Lüftung, Licht-



und Bodenverhältnisse, Hygiene in Schulen, Krankenhäusern und Massenunterkünften, Wasser und Wasserversorgung, Kanalisation sowie die speziellen Lebensbedingungen in Städten. Pettenkofers Untersuchungen und seine experimentellen Methoden einer verbesserten Hygiene führten zusammen mit dem Problem der Krankheitsverhütung, das sich in großen Städten und neuen Industrieregionen immer schärfer stellte, zu einer modernen Gesundheitspolitik. Gesundheitssicherung wurde zu einem eigenen Politik-, Wirtschafts- und Verwaltungsbereich, und es erfolgten bis dahin unvorstellbar große Investitionen in die gesundheitsrelevante Infrastruktur der Städte. Davon betroffen waren unter anderem Wohnhäuser, Nahrungsmittelversorgung, Straßenbau, Kanalisation, Gewerbehygiene, Schlachthäuser, Markthallen, Müllabfuhr und vieles mehr.

Als die Cholera wütete, sah Pettenkofer die Ursachen dafür im Grundwasser und im Boden. Andere Wissenschaftler, etwa der italienische Anatom Filippo Pacini (1812–1883), vertraten die Ansicht, die Krankheit werde durch Bakterien hervorgerufen. Sie konnten sich aber nicht durchsetzen, bis es dem Mediziner Robert Koch (1843–1910) in den 1880er Jahren gelang, Choleraerreger in Reinkultur zu gewinnen. Koch erkannte zudem, dass die Bakterien mit Wasser übertragen werden.

Den Ansatz, bakterielle Keime als Ursache einer Erkrankung nachzuweisen, hatte Koch zunächst am Milzbrand und an Wundinfektionen entwickelt und auf die Tuberkulose angewendet. Er löste damit einen Höhenflug der Bakteriologie aus; zahlreiche Forscher traten in seine Fußstapfen und entdeckten bald einen Infektionserreger nach dem anderen. Für das Gesundheitswesen bedeutete dies einen wichtigen Strategiewechsel: Jetzt ließen sich Erreger spezifisch bekämpfen, etwa durch Isolieren der Keimträger; zudem konnte man Zwischenwirte und Übertragungswege in den Blick nehmen. Therapien, die auf eine Immunisierung der Patienten abzielten, verhießen eine gesündere Zukunft.

Horizontale versus vertikale Sichtweise

Die alternativen Sichtweisen – entweder das Lebensumfeld oder spezifische Erreger als Krankheitsursache – gerieten schon bald in Konflikt miteinander. Pettenkofer versuchte, das Krankheitsgeschehen ganzheitlich zu sehen und daraus Interventionen im öffentlichen Bereich abzuleiten. Aus heutiger Perspektive formuliert, betrachtete er das Seuchengeschehen als einen umfassenden, komplexen Vorgang und griff »horizontal« ein, indem er darauf hinwirkte, das gesamte Umfeld der Betroffenen zu sanieren. Er sah im jeweiligen Keim zwar eine notwendige, aber keine hinreichende Ursache für den Ausbruch einer Erkrankung.

Koch dagegen ging stets von der spezifischen Wirksamkeit des Keims aus, wie sie sich im Labor nachweisen ließ.

An dem Selbstversuch mit Choleraerregern starb Rudolf Emmerich beinahe

ALAMY / CULTURA CHEMIE LTD / CALESTRA IMAGES

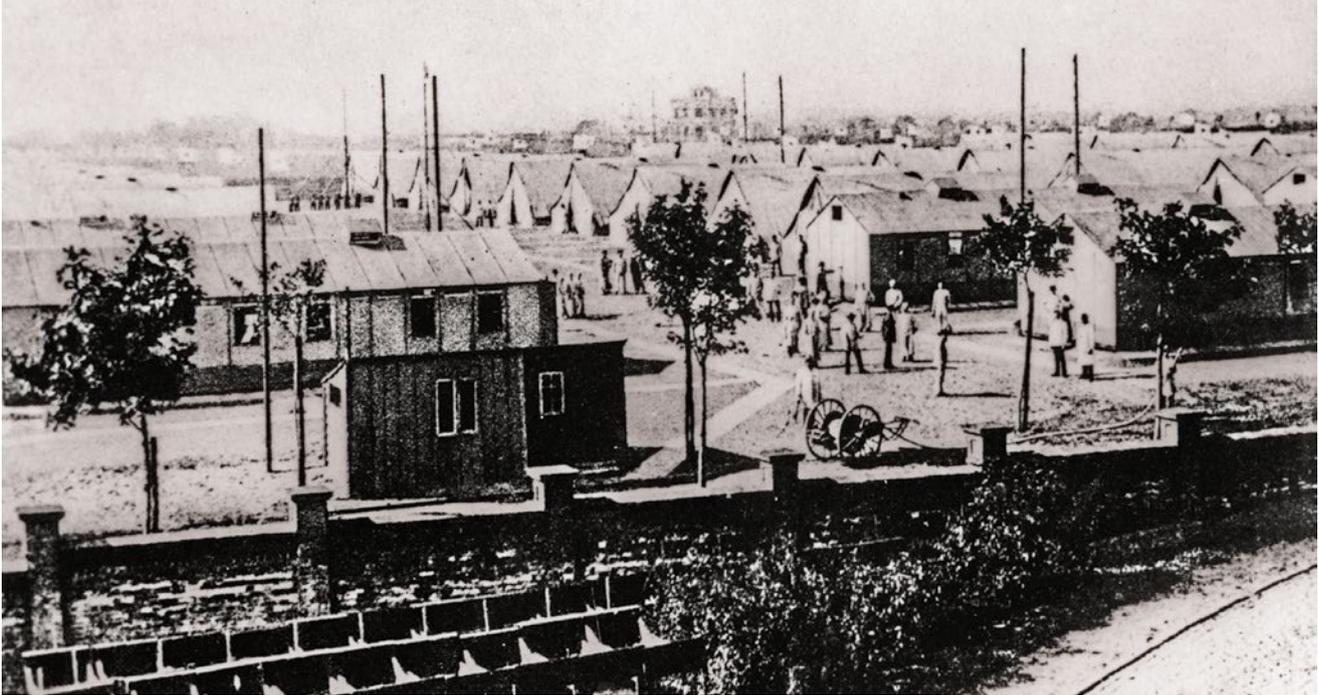


Elektronenmikroskopische Aufnahme von *Vibrio cholerae*-Bakterien, den Erregern der Cholera. Sie wurden bereits 1854 von dem italienischen Anatomen Filippo Pacini beschrieben.

Er hatte ausschließlich das Ziel, den bakteriellen Keim zu isolieren und zu vernichten beziehungsweise die Infektionskette zu unterbrechen – sowohl im klinischen Bereich als auch später in seinen öffentlichen Maßnahmen der Seuchenkontrolle. Anders gesagt: Koch griff »vertikal« ein und kümmerte sich nicht oder kaum um die Umgebung der Betroffenen.

Dieser Konflikt äußerte sich unter anderem in einem bemerkenswerten medizinhistorischen Geschehnis. Während der Choleraepidemie in Hamburg 1892 verkündete Koch, das krank machende Bakterium und seine Verbreitung über das Trinkwasser sei die alleinige Ursache. Max von Pettenkofer und seinen Schüler Rudolf Emmerich (1852–1914) provozierte das zu einem Selbstversuch. Beide schluckten im Oktober 1892 eine Lösung mit Cholera Bakterien (*Vibrio cholerae*), die sie sich aus Kochs Labor hatten zusenden lassen. Ihre Überlegung: Sollte eine Infektion mit den Mikroben tatsächlich ausreichen, um Cholera zu verursachen, würden sie erkranken – andernfalls nicht.

Pettenkofer bekam nur leichte Symptome, Emmerich hingegen starb fast. Pettenkofer veröffentlichte einen minuziösen Bericht des Selbstversuchs, in dem er resümierte, die Aufnahme von Cholera Bakterien allein mache nicht krank, sondern es käme auf die Umweltbedingungen an. Eine keimfreie Wasserversorgung genüge keinesfalls zur Seuchenabwehr, sondern es müssten auch die örtlichen Verhältnisse so gestaltet werden, dass eine Epidemie überhaupt nicht entstehen könnte. Er schloss bissig: »Ich würde ja gerne auch Kontagionist werden, die Ansicht ist ja so bequem und erspart alles weitere Nachdenken.«



ALAMY / INTERFOTO / HISTORY

Während der Choleraepidemie 1892 in Hamburg entstand ein Feldhospital, um die Kranken zu isolieren und zu behandeln. Die Seuche forderte zirka 8600 Tote.

Zu einem weiteren Schlagabtausch zwischen den Schülern Kochs und Pettenkofers kam es infolge der Gelsenkirchener Typhusepidemie von 1901. Rund 3300 Menschen erkrankten, etwa 500 von ihnen starben an dem Infekt. Weil der Sommer trocken und der Wasserverbrauch hoch gewesen war, hatten die Betreiber des lokalen Wasserwerks kurzerhand ein Rohr in die Ruhr gelegt und darüber ungereinigtes Wasser ins Leitungswerk eingespeist. Koch, als Experte hinzugerufen, bemerkte das schnell und betrachtete die Ursache als ermittelt; der ungereinigte Zufluss wurde abgedreht.

1904 gab es dazu einen Gerichtsprozess, in dem Koch und Emmerich als Gutachter auftraten. Der Erste war überzeugt davon, Typhusbakterien im Trinkwasser (die sich nach vielen Versuchen im Labor hatten nachweisen lassen) hätten die Epidemie verursacht. Der Zweite beharrte darauf, die mangelnde Hygiene in der völlig verschmutzten und verwahrlosten Region sei der Grund gewesen. Die Debatte eskalierte, als herauskam, dass die Wasserwerksbetreiber bereits seit mehr als einem Jahr die Ruhr permanent angezapft hatten. Somit war lange Zeit mehr als ein Drittel des eingespeisten Trinkwassers nicht vorgeklärt gewesen, ohne dass es zu einer Seuche gekommen war. Die Richter sahen sich außer Stande, ein Urteil zu fällen. Als Ergebnis des Streits erhielt Leitungswasser jedoch den Status eines Nahrungsmittels, als das es in Deutschland bis heute behandelt und daher streng kontrolliert wird.

Die Cholera forcierte nicht nur eine neue Sichtweise auf Krankheiten und Seuchen, sie zeigte auch deutlich auf, wie sehr internationale Bemühungen zur Gesundheitssicherung notwendig geworden waren. Die Infektionskrankheit verbreitete sich in mehreren Pandemiewellen um den Globus, begünstigt durch den internationalen Schiffsverkehr, der im Zuge von Imperialismus und Industrialisierung erheblich zunahm. 1817 bis 1824 erreichte sie, wohl von Indien ausge-

hend, Europa; 1826 bis 1841 gelangte sie bis nach Nordamerika. Zwischen 1852 und 1876 flammte sie, unter anderem wegen des Krimkriegs, mehrmals in Europa auf, von wo sie abermals nach Amerika übersprang. Eine weitere Welle zwischen 1882 und 1896 verursachte im Jahr 1892 eine Epidemie in Hamburg, die 8600 Menschen das Leben kostete und bis heute in Erinnerung geblieben ist. An Bord von Schiffen gelangten infizierte Auswanderer von Hamburg nach New York, wo sich die Seuche weiter ausbreitete.

Bei Krankheitsverdacht mit Kreide markiert

Um so etwas künftig zu verhindern, ließ die US-Bundesregierung künstliche Inseln im Hafengebiet bei New York City aufschütten, wo man eintreffende Einwanderer mit ansteckenden Krankheiten in Quarantäne halten konnte. 1892 wurde auf Ellis Island eine Quarantäne-Durchgangsstation gegründet, die bis heute zu besichtigen ist. Dort ging es durchaus rabiat zu: Kranke durften nicht passieren und mussten wieder abreisen, Kinder wurden von ihren Eltern getrennt. Hatten Ankommende das Schiff verlassen, mussten sie eine Treppe nutzen, um sich registrieren zu lassen. Stationsmitarbeiter begutachteten den Gang der Einreisenden bereits auf den Stufen und untersuchten danach deren sonstigen Gesundheitszustand. Verdächtige bekamen ein Kreidezeichen auf den Rücken und mussten längere Zeit in Quarantäne. Im Volksmund bekam die Insel deshalb schon bald den Namen »Isle of Tears«.

Während der Schiffsverkehr der Cholera half, die Ozeane zu überwinden, hing die kontinentale Ausbreitung der Krankheit häufig mit Truppenbewegungen zusammen. Generell zeigte sich, dass der im 19. Jahrhundert ständig zunehmende Strom von Waren und Menschen auf Straßen, Gleisen und Schiffsrouten eine staatenübergreifende Gesundheitssicherung immer nötiger machte. Wegen der nun regelmäßig wiederkehrenden Seuchen fanden seit Mitte des Jahrhunderts sowohl regionale als auch internationale Gesundheitskonferenzen statt, die 1903 in eine internationale Hygiene-Konvention (unterzeichnet im Rahmen der 11. International Sanitary Conference) mündeten. 1920 richtete der Völkerbund gelegentliche Epidemie-

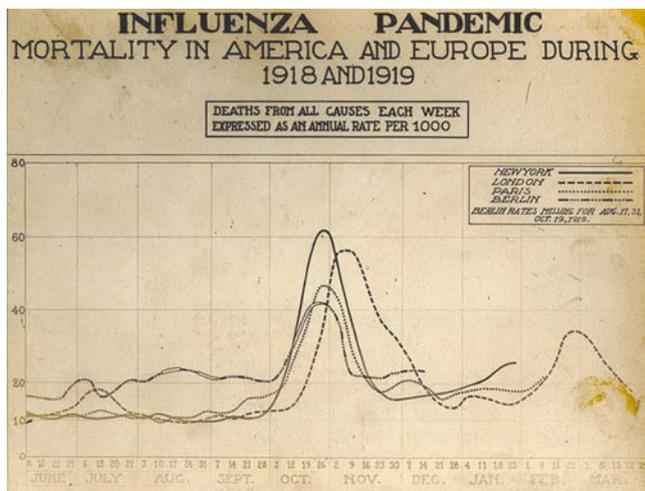
Kommissionen ein und gründete 1923 eine Hygiene-Sektion sowie einen Beraterstab. 1948 wurde die Weltgesundheitsorganisation gegründet.

Eine konkrete Folge dieser Bemühungen waren Büros an zentralen Stellen des internationalen Seeverkehrs, die das Seuchengeschehen überwachen, die entsprechenden Meldungen weitergeben und etwaige Quarantänemaßnahmen durchführen sollten. Im Zentrum der Aufmerksamkeit stand zunächst die Cholera; nach dem Ausbruch einer Pestwelle im späten 19. und frühen 20. Jahrhundert trat diese Krankheit ebenfalls in den Fokus sowie das Gelbfieber, das Ende des 19. Jahrhunderts den Bau des Panama-Kanals mehrfach zum Erliegen brachte.

Die Cholera und die Methoden zu ihrer Bekämpfung waren freilich nicht nur unter Politikern und Medizinern ein Thema. Auch in den öffentlichen Debatten des 19. Jahrhunderts spielte die Seuche eine maßgebliche Rolle. Zeitgenössische Schilderungen erwecken zuweilen den Eindruck, unter dem Druck der Epidemie seien zivilisierte Weltstädte im Chaos versunken. Eindrücklich findet sich das etwa bei dem Dichter Heinrich Heine (1797–1856), der seine Berichte aus Paris 1832 unter dem Titel »Französische Zustände« in der »Augsburger Allgemeinen Zeitung« veröffentlichte. Die Seuche hatte die französische Hauptstadt am 29. März erreicht; die Menschen brachen auf offener Straße zusammen, Entsetzen und Hilflosigkeit machten sich breit. Man mied die Infizierten und ließ Kranke und Sterbende allein, was durchaus gewisse Parallelen zum Umgang mit Covid-19 aufweist. Und genauso wie heute blühten schon damals abstruse Verschwörungsmythen. »Giftmischerei« sollte das große Sterben ausgelöst haben, »Verdächtige« wurden von aufgebrachten Passanten erschlagen, die Aufklärung war vielfach passé, es herrschte blanke Angst.

Ausgrenzung, Stigmatisierung, Verdächtigung und Denunziation waren immer wiederkehrende Begleiterscheinungen der Cholerapandemien. Auch hier lassen sich

Der Ausbruch der Spanischen Grippe ließ die Todesraten in amerikanischen und europäischen Städten stark ansteigen. Dieses zeitgenössische Diagramm zeigt das für die Jahre 1918 und 1919.



NICHOLS, H. PANDEMIC INFLUENZA: THE INSIDE STORY. PLOS RHOLOGY 4, E50 (2008). FIG. 3A. DOI: 10.1371/JOURNAL.PLOS.0040050 / CC BY 4.0 / CREATIVE COMMONS ORGANIZATION

Schon rund um die Cholera blühten abstruse Verschwörungsmythen

gewisse Ähnlichkeiten zu heute erkennen: Waren es früher die »Französischen Zustände«, so sind es nun ständige Verweise auf Karnevalisten, Skifahrer oder Jugendliche, die sich trotz Kontaktsperre treffen; oder die aufputschende Covid-Berichterstattung in manchen Medien, die dem Publikum am laufenden Band angebliche Skandale und Schauergeschichten liefert.

Empfundene und tatsächliche Gefahr

Aus den Berichten des 19. Jahrhunderts ergibt sich leicht der Eindruck, die Cholera habe an der Spitze der tödlichen Krankheiten gestanden. Bereits ein kurzer Blick in zeitgenössische Kranken- und Todesstatistiken der Zeit zeigt aber etwas anderes. In Berechnungen des deutschen Mediziners Friedrich Oesterlen (1812–1877) zur Sterblichkeit in England zwischen 1850 und 1859 beispielsweise erscheint in der Klasse der »zymotischen Krankheiten« (eine damalige Bezeichnung für Infektionskrankheiten, die deren Ähnlichkeit mit chemischen Gärungsvorgängen betonte) die Cholera erst an achter Stelle der Todesursachen; lediglich während einer Epidemie 1854 rückte sie auf Platz eins. Weit mehr Tote in dieser Erkrankungsgruppe forderten Scharlach, Typhus und Diarrhoe, mit großem Abstand gefolgt von Keuchhusten, Masern, Pseudokrupp und Pocken – und erst dann Cholera.

Das zeigt: Die Wahrnehmung öffentlicher Gesundheitsgefahren ist nicht nur von tatsächlichen Risiken bestimmt. Vielmehr haben wir es im historischen Rückblick oft mit »skandalisierten Krankheiten« zu tun. Mit diesem Begriff bezeichnen wir – rein beschreibend, nicht wertend – Erkrankungen, deren tatsächliche epidemiologische Bedeutung in einem Missverhältnis zu ihrer öffentlichen Wahrnehmung und den daraus folgenden Reaktionen steht. Skandalisierte Krankheiten haben die Maßnahmen öffentlicher Gesundheitssicherung nachhaltig geprägt, wobei das nicht immer auf rational nachvollziehbare Weise geschah. Vielmehr bilde(te)n akute und als bedrohlich empfundene Seuchen wichtige Argumente, um öffentliche Gesundheitsleistungen zu diskutieren und durchzusetzen.

Skandalisierte Krankheiten sind nicht immer vordringliche Gefahren für die öffentliche Gesundheit. Sie erzeugen aber Furcht, da über sie wenig bis nichts bekannt ist, da sie exotisch erscheinen oder weil sie die öffentliche Aufmerksamkeit auf gesellschaftliche Prozesse richten, die häufig bereits im Gang sind – heute etwa die fortschreitende Globalisierung oder die Zerstörung natürlicher Habitate. Der Konflikt zwischen statistischen Erhebungen, Risikoabschätzungen und individueller Wahrnehmung ist hier oft nur schwer zu lösen. Menschen nehmen Krankheitsstatistiken zwar auf einer abstrakten Ebene wahr, beziehen sie aber nicht konkret auf sich: Sie interessieren sich nicht für Fallzahlen, sondern dafür, ob sie selbst krank werden.

Hausmittel wie Alkohol, Kaffee, Hühnersuppe und Tee hatten Konjunktur

Die Choleraepidemien lagen noch nicht lange zurück, als eine neue Seuche auftauchte, die zu weltweiten Verwerfungen führte. In den Jahren 1918 und 1919 verbreitete sich die so genannte Spanische Grippe, eine Influenza, um den Globus und forderte Abermillionen Todesopfer. Politiker und Ärzte standen vor einem Rätsel: Weder war klar, was die Krankheit verursachte, noch wie sich die Pandemie stoppen ließ. Deutsche Mediziner spekulierten, Hilfstruppen der Entente (der Erste Weltkrieg lag in den letzten Zügen) könnten die Krankheit aus dem Fernen Osten eingeschleppt haben. Auch Truppenlager der Amerikaner wurden als Quelle verdächtigt. Auf Seiten der Alliierten kolportierte man das Gerücht, die Deutschen hätten eine biologische Waffe in Umlauf gebracht.

Bis heute wird die Pandemie als Spanische Grippe bezeichnet, da in Spanien, das nicht aktiv am Krieg teilnahm, eine weniger scharfe Pressezensur herrschte als in den Krieg führenden Staaten, weshalb die ersten Nachrichten über die Influenza von dort kamen. Spanische Ärzte hatten als Erste in Europa schärfere Maßnahmen zum Schutz vor der Krankheit eingeleitet. Im Deutschen Reich dagegen war man zögerlich. Ende Mai 1918 erreichte die Pandemie Deutschland; im Juli und im Oktober kam der Reichsgesundheitsrat zusammen, um über die zunehmenden Krankheits- und Todesfälle zu beraten. Obwohl sich die Situation in diesem Zeitraum deutlich zugespitzt hatte, beschloss der Rat weder eine Meldepflicht der Erkrankung noch ein Versammlungsverbot. Zahlreiche Ärzte forderten, Theater zwecks Eindämmung der Seuche zu schließen und Veranstaltungen abzusagen; die Kommunen jedoch versuchten, das so weit wie möglich zu verhindern. Bei politisch Verantwortlichen herrschte die Sorge, derartige Eingriffe könnten die ohnehin bröckelnde »Heimatfront« schwächen. Es wurde lediglich Schulen anheimgestellt, falls nötig zu schließen. Die Bevölkerung erhielt den Rat, sich häufig die Hände zu waschen, mit Salzwasser zu gurgeln und bei Erkrankung im Bett zu bleiben.

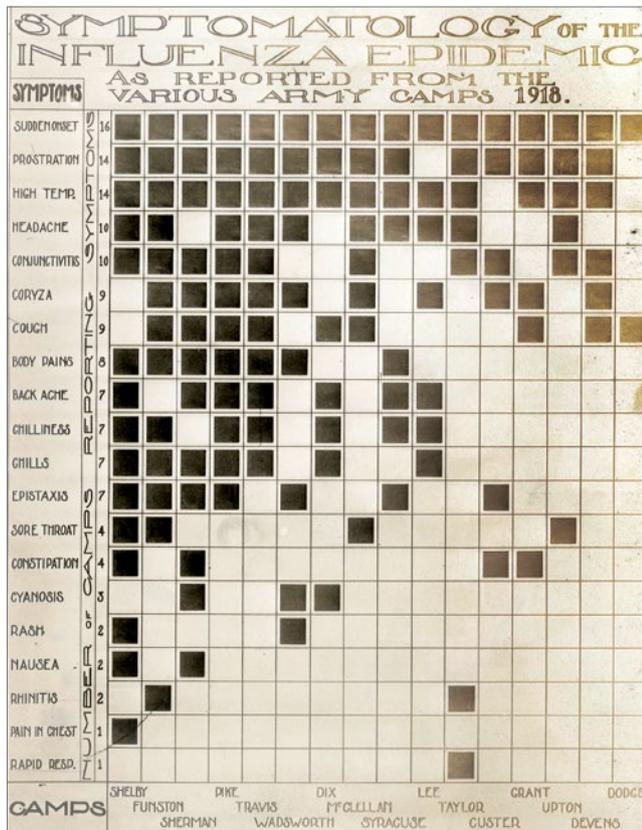
Unterdessen stritten Wissenschaftler darum, was der Auslöser der Spanischen Grippe sei. Da sich kein bakterieller Keim dingfest machen ließ, griffen manche Forscher auf überholte, historisch-geografische Vorstellungen zur Seuchenentstehung zurück. Schließlich kam die Theorie auf, ein Virus (noch nicht in der heutigen Bedeutung, sondern im Sinne eines »Giftes«) sei der Verursacher.

Weit entfernt von diesem theoretischen Diskurs arbeiteten die praktizierenden Ärzte an den Krankenbetten. In ihrem therapeutischen Bemühen waren sie zumeist hilflos. Hausmittel wie Alkohol, Kaffee, Hühnersuppe oder Tee hatten Konjunktur. Die hohen Sterberaten dokumentieren, wie wenig effektiv solche Maßnahmen waren. Mediziner stritten darum, wie wirksam die verschiedenen Ansätze der

öffentlichen Gesundheitssicherung gewesen seien – selbst noch, als das Schlimmste bereits vorbei war. Im Jahr nach der Pandemie nahm der Diskurs über »Public Health« in den westlichen Industriestaaten sogar an Fahrt auf und avancierte zum vorherrschenden medizinischen Debattenthema. Die Gesundheitspolitik und -propaganda widmete sich diversen Aspekten: von der körperlichen Verfassung über das soziale Umfeld, die Umweltbedingungen und Ernährung bis hin zur Vererbung. Gesundheitsfürsorge erfasste beinahe alle Bereiche menschlichen Lebens; Krankheitsprävention war das Gebot der Stunde. Der amerikanische Schriftsteller Sinclair Lewis (1885–1951) hat dieses Phänomen in seinem Roman »Arrowsmith« von 1925 gekonnt karikiert und dabei beschrieben, wie Gesundheitspolitiker »bessere Babys-Wochen«, »mehr Babys-Wochen« und »Anti-Tuberkulose-Wochen« veranstalten, sich für frische Luft, weniger Alkohol- und Nikotinkonsum und gesündere Zähne engagieren und nach dem Nutzen von Gesichtsmasken während einer Influenzapandemie fragen.

Auf diesem Bild von 1918 verweigert ein Straßenbahnschaffner in Seattle (USA) einem Fahrgast die Mitfahrt, weil dieser keine Gesichtsmaske trägt.





Zu den besonders häufigen Symptomen der Spanischen Grippe in amerikanischen Militärcamps gehörten plötzlichliches Erkranken, Erschöpfung und Fieber.

Was bedeutet das alles im Hinblick auf Sars-CoV-2? Viele Aspekte der Covid-Pandemie kommen uns von früheren Epidemien her bekannt vor, wenngleich wir uns hüten müssen, die Geschichte nur für Vergleiche mit der Gegenwart zu nutzen. Die Gesellschaften, der Wissens- und Kenntnisstand und die medizinischen Möglichkeiten damals und heute unterscheiden sich dafür zu sehr. Was wir aber mitnehmen können aus medizinhistorischen Betrachtungen: Jede Zeit greift auf vorherige Muster der Gesundheits-sicherung zurück, die sie weiterdenkt und weiterentwickelt.

In den 1920er Jahren, kurz nachdem die Spanische Grippe gewütet hatte, bestimmte Krankheitsprävention auf allen Ebenen die gesellschaftlichen Debatten. Da man weder den Erreger kannte noch eine zielgerichtete Therapie existierte, mussten die Menschen auf uralte Mechanismen der Seuchenbekämpfung ausweichen: Händewaschen und Lüften, Gesichtsmasken und Schulschließungen und so weiter. Die anschließende Ausweitung der Präventionsmaßnahmen setzte auf horizontale Eingriffe, also eine umfassende Verbesserung des Lebensumfelds, wie sie Max von Pettenkofer Jahrzehnte zuvor entwickelt hatte.

Auf diesen Pfaden bewegen sich auch die Schritte gegen die aktuelle Pandemie. Während Mediziner und Gesundheitspolitiker letztlich auf eine Impfung als möglichst effektiven vertikalen Eingriff hoffen, versuchen sie bis dahin

horizontale Ansätze wie Abstandsregeln, allgemeine Hygiene, Maskenpflicht und Versammlungsverbote durchzusetzen. Sie diskutieren Lebensbedingungen von Fabrikarbeitern, das Zusammenleben von Mensch und Tier, klimatische Bedingungen und menschliches Verhalten, Risikofaktoren wie Alter oder Geschlecht und wie sich dem horizontal begegnen lässt, etwa durch Besuchsverbote in Alten- und Pflegeheimen. Sie greifen dabei auf internationale Institutionen zurück, die sich seit dem 19. Jahrhundert entwickelt und bewährt haben.

Ebenso reagiert die Bevölkerung auf eine Weise, die historische Parallelen hat. Ob Ausgrenzung, etwa das Einfordern einer Grenzschließung; Stigmatisierung, etwa als »Corona-Leugner«; Verdächtigung, beispielsweise hinsichtlich einer angeblich geplanten staatlichen »Umgestaltung«; Denunziation, heute vielfach über die »sozialen Medien«; bis hin zu grotesken Verschwörungsmysmen. Einige Medien versuchen ebenfalls, wie aus der Geschichte vielfach bekannt, mit Skandal-, Angst- und Empörungsgeschichten die Situation für sich auszunutzen. Eine wichtige Frage, die sich wohl erst nach der Pandemie abschließend beantworten lassen wird, ist die, inwiefern es sich bei Covid-19 um eine skandalisierte Krankheit handelt. Die wichtigste aber wird wohl sein, was die heutigen Gesellschaften aus der Erfahrung mit Sars-CoV-2 für ihr künftiges kulturelles Miteinander lernen. Neben einer besseren Prävention sowie einer zügigeren Reaktion auf Seuchen sollte dazu sicherlich zählen, Härten und Ungerechtigkeiten, die aus Schutzmaßnahmen folgen, zu minimieren und auszugleichen. ◀

LITERATURTIPP

Fangerau, H., Labisch, A.: Pest und Corona – Pandemien in Geschichte, Gegenwart und Zukunft. Herder, München 2020

Die Autoren nehmen historische Pandemien in den Blick. Sie erörtern, wie Seuchen das öffentliche und private Leben verändert haben, welches ihre natürlichen, sozialen, historischen und kulturellen Hintergründe waren und worauf wir uns künftig einrichten müssen, wenn wir unsere Lebensart bewahren wollen.

QUELLEN

Cochrane, A. L.: Effectiveness and efficiency. Random reflections on health services. London: Nuffield Provincial Hospital Trust, 1972

Lilienfeld, A. M., Lilienfeld, D. E.: Foundations of epidemiology. Oxford University Press, 1980

Lilienfeld, A. M. (Hg.): Times, places, and persons. Aspects of the history of epidemiology. Conference on the history of epidemiology, 1978 (Bulletin of the history of medicine. The Henry E. Sigerist supplements, new series, 4). Johns Hopkins University Press, 1980

Tomkins, S. M.: The failure of expertise: Public health policy in Britain during the 1918–19 Influenza epidemic. Social History of Medicine 5, 1992

Witte, W.: The plague that was not allowed to happen. German medicine and the influenza epidemic of 1918–19 in Baden. In: Phillips, H., Killingray, D. (Hg.): The Spanish Influenza Pandemic 1918–19. New perspectives (Routledge Studies in the Social History of Medicine). Routledge 2003, S. 49–57

EPIDEMIOLOGIE DICKE LUFT

Mit der Menge an Feinstaub nehmen auch die Demenzzfälle in einer Region zu. Neuere Untersuchungen zeigen, wie die Partikel von Lunge und Nase zum Gehirn gelangen und dort Schäden anrichten können.



Ellen Ruppel Shell ist Journalistin und Professorin für Wissenschaftsjournalismus an der Boston University in Massachusetts, USA. Sie hat mehrere Bücher geschrieben; ihre Artikel erschienen unter anderem in »The Atlantic«, »The New York Times« und »Science«.

» spektrum.de/artikel/1773711

Smog über Los Angeles, der Stadt mit der stärksten Luftverschmutzung in den USA.

Mein erster Tag in Mexiko-Stadt war hart. Der Smog war so dicht, dass ich beim Treppensteigen nach Luft schnappte. Mit Kopfschmerzen hatte ich gerechnet; die Stadt liegt auf einem Plateau 2250 Meter über dem Meeresspiegel, und der Sauerstoffgehalt der Luft ist dementsprechend geringer als an der Küste. Ich war jedoch überrascht, wie sehr die schadstoffbelastete Luft in meinen Augen und meiner Lunge brannte.

1992 erklärten die Vereinten Nationen Mexiko-Stadt zur am stärksten verschmutzten Metropole der Welt. Seither hat ihre Verwaltung viel unternommen, um die Situation zu verbessern. Mit einigen Erfolgen: Die Stadt ist zu Recht stolz auf ihre kilometerlangen Radwege und üppigen Parks. Ein Blick auf den verwischten Horizont offenbart jedoch, dass die Anstrengungen noch nicht ausreichen. An den meisten Tagen weist die Luft weit mehr Rußpartikel auf, als von der Weltgesundheitsorganisation festgelegte Grenzwerte empfehlen. Dazu kommen erhöhte Mengen anderer Schadstoffe. Rund 9,6 Millionen Fahrzeuge und schätzungsweise 50000 Fabrikschlote pusten ihre Abgase ins Stadtge-

AUF EINEN BLICK WIE LUFTVERSCHMUTZUNG UND DEMENZ ZUSAMMENHÄNGEN

- 1** Menschen, die langfristig in Gebieten mit stark schadstoffbelasteter Luft leben, haben ein höheres Risiko, später im Leben an Morbus Alzheimer zu erkranken.
- 2** Als besonders besorgniserregend stufen Experten die Daten zum Einfluss von Feinstaub ein. Die winzigen Partikel können zahlreiche Neurotoxine enthalten und beim Atmen ins Gehirn eindringen.
- 3** Die Erkenntnisse bieten neue Möglichkeiten zur Alzheimerprävention: Neben Denksport und Bewegung dürfte auch die Reduktion von Luftschadstoffen Krankheitsfälle verhindern.



biet. Diese hüllen die Metropole in ein giftiges Gebräu, das Lungen und Herzen schädigt. Viele Wissenschaftler sind sich mittlerweile einig, dass die Verschmutzung sogar das Nervensystem beeinträchtigt.

Eine 2018 veröffentlichte Untersuchung fand im Gehirn von Bewohnern der Stadt für Alzheimer charakteristische Zerstörungen. Die Probanden waren allesamt jünger als 40. Normalerweise zeigen sich erste Anzeichen der Erkrankung erst in wesentlich höherem Alter. Vor einigen Jahren publizierte ein Team an der Harvard University eine Analyse der Daten von zehn Millionen US-amerikanischen Medicare-Empfängern über 65, die in 50 unterschiedlichen Städten im Nordosten der USA lebten. Die Wissenschaftler hatten einen starken Zusammenhang zwischen bestimmten Luftschadstoffen und der Häufigkeit von mehreren neurodegenerativen Erkrankungen entdeckt, darunter Alzheimer.

Weitere Untersuchungen lieferten ähnliche Ergebnisse. »Der Einfluss der Luftverschmutzung entwickelt sich zu einem der heißesten Gebiete in der Alzheimerforschung«, erklärt George Perry, Neurobiologe an der University of Texas in San Antonio und Chefredakteur des »Journal of Alzheimer's Disease«. Viele Experten haben erkannt, dass Luftverschmutzung zur Krankheitsentstehung beitragen kann, so Perry. Der Toxikologe Masashi Kitazawa von der University of California in Irvine bestätigt diese Einschätzung. »In der Alzheimerforschung spielt die Wirkung von Genen eine große Rolle, und lange wollte fast niemand darüber hinausblicken«, sagt er. »In den letzten drei oder vier Jahren ist die Zahl der Arbeiten, die Luftverschmutzung und kognitive Einbußen in Verbindung bringen, jedoch geradezu explodiert.« Bei der häufigsten Form der Alzheimerkrankheit, die erst spät beginnt, könnten Lebensstil und schädliche Umwelteinflüsse 40 bis 65 Prozent des Erkrankungsrisikos bedingen. Luftverschmutzung ist dabei einer der Hauptfaktoren.

Feinstaub enthält Hunderte von Substanzen, von Giftstoffen bis hin zu lungen-gängigen Partikeln

Besonders bedenklich sind Daten zu schwebenden, mit Giftstoffen gefüllten Tröpfchen oder Festkörperpartikeln mit einem Durchmesser von etwa dem Dreißigstel eines menschlichen Haares. Dieser Feinstaub (wegen seiner spezifischen Größe auch als PM_{2,5} bezeichnet) entsteht typischerweise beim Verbrennen von Öl, Gas, Kohle und Holz. Vor allem Autos, Lastwagen und Kraftwerke stoßen ihn aus. Mit jedem Atemzug gelangen die Partikel tief in die Lunge und von dort aus ins Blut. PM_{2,5} hat auf solche Weise verheerende Auswirkungen auf die Atemwege und das Herz-Kreislauf-System des Menschen. Krebs, Herzinfarkte, Schlaganfälle und vorzeitige Todesfälle nehmen mit der Schadstoffbelastung zu.

Früher glaubte man, das Gehirn sei vor einem solchen Angriff geschützt. Es verfügt schließlich über die Blut-Hirn-Schranke, eine Schicht dicht gepackter Zellen, die Blutgefäße des Gehirns auskleidet. Die Barriere hindert toxische Substanzen daran, aus dem Blut in das Hirngewebe zu sickern. Leider gibt es überzeugende Belege dafür, dass PM_{2,5} nichtsdestoweniger ins Gehirn gelangen können, und zwar auf gleich zwei Wegen: Erstens können die Partikel die Blut-Hirn-Schranke verändern, um sie für Schadstoffe durchlässiger zu machen. Zweitens können sie die Schranke vollständig umgehen, indem sie über die Nase in den Riechnerv eindringen und von hier aus in den Riechkolben wandern. Das Gehirn ist, wie sich herausgestellt hat, kaum besser vor den unerbittlichen Angriffen der Luftverschmutzung geschützt als andere Organe.

Alzheimer-typische Ablagerungen in den Gehirnen von Babys und Kleinkindern

Viele der neueren Arbeiten, die Zusammenhänge zwischen schlechter Luftqualität und Hirnerkrankungen sehen, bauen auf den Forschungen von Lilian Calderón-Garcidueñas auf. Die Neuropathologin von der University of Montana wurde unweit von Mexiko-Stadt geboren und wuchs nahe der Metropole auf. Seit Jahrzehnten untersucht sie die gesundheitlichen Auswirkungen der Schadstoffbelastung in der Region. Anfang der 2000er Jahre sezierte sie 32 Hunde, die im Südwesten von Mexiko-Stadt gelebt hatten. In deren Gehirn fand sie Anzeichen für degenerative Prozesse.

Diese Entdeckung veranlasste sie dazu, Menschen zu untersuchen, die in ähnlichen Stadtvierteln gewohnt hatten. Was sie sah – Ablagerungen wie bei Alzheimerpatienten im Gehirn von Babys und Kleinkindern –, alarmierte sie. Die Belastung durch Luftverschmutzung, schrieb sie 2008, solle als Risikofaktor für Alzheimer angesehen werden. Das gelte insbesondere für Menschen, die auf Grund ihrer Erbanlagen anfälliger für die Krankheit sind.

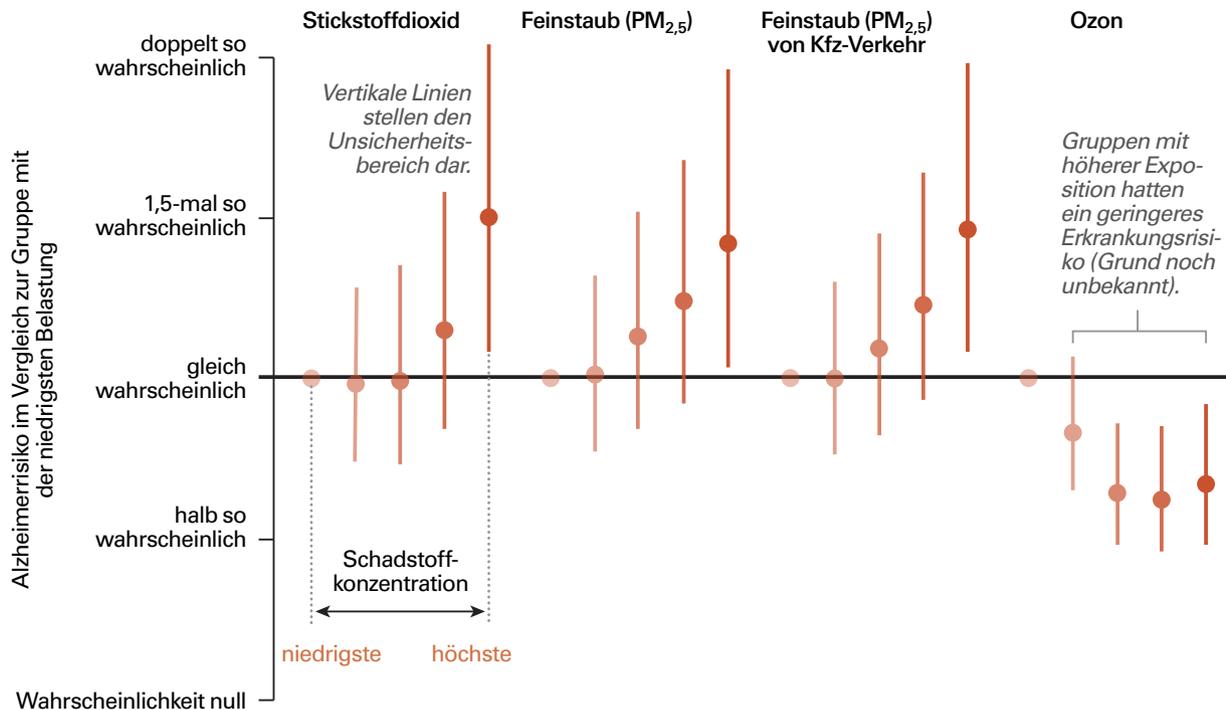
Jüngere Studien untermauern die Schlussfolgerungen von Calderón-Garcidueñas. Jennifer Weuve, außerordentliche Professorin an der Boston University School of Public Health, leitete eine der ersten USA-weiten Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Luftverschmutzung und neurologischen Erkrankungen. Die Ergebnisse veröffentlichten sie und ihr Team 2012. »Wir hatten zwei Hinweise auf die Verbindung zwischen dem alternden Gehirn und der Luftverschmutzung«, erklärt sie. Der erste war die Auswirkung auf das Herz-Kreislauf-System: eine zunehmende Anzahl an Herzinfarkten und Schlaganfällen. »Das Gehirn ist auf eine funktionierende Blutzirkulation angewiesen. Deshalb gab das natürlich Anlass zur Sorge, das Gehirn könnte ebenfalls betroffen sein.«

Der zweite Hinweis war subtiler. Toxikologen führten einige gut kontrollierte Studien an Tieren durch, die Luft mit einem hohen Anteil an Schwebstaub ausgesetzt wurden. Tatsächlich gelangten dabei Teilchen ins Gehirn. »Manche dieser Partikel enthielten bekannte Neurotoxine wie Mangan. Wir wussten, das kann nicht gut sein«, so Weuve.

Inzwischen bestätigen Daten aus weiteren epidemiologischen Untersuchungen, dass der Feinstaub einen Risikofaktor darstellt. Für eine 2018 veröffentlichte Studie hatten

Gehirne leiden unter schlechter Luft

Von 2005 bis 2013 untersuchten Forscher knapp 131000 Menschen im Alter von 50 bis 79 Jahren, die im Großraum London lebten. Bei ihnen war zuvor keine Alzheimerkrankheit diagnostiziert worden. Die Wissenschaftler kartierten die Konzentrationen spezifischer Luftschadstoffe in den Wohngebieten dieser Menschen und teilten sie nach dem Grad ihrer Belastung in fünf Gruppen ein. Verglichen mit der Gruppe mit der niedrigsten Belastung stieg die Wahrscheinlichkeit, an Alzheimer zu erkranken, in den beiden Gruppen mit den meisten Schadstoffen wie Stickstoffdioxid sowie in den drei Gruppen mit höheren Werten für toxische Abgaspartikel, die als $PM_{2,5}$ bekannt sind. Das vermehrte Risiko blieb auch dann bestehen, wenn Faktoren wie Rauchen, Alter und Geschlecht berücksichtigt wurden.

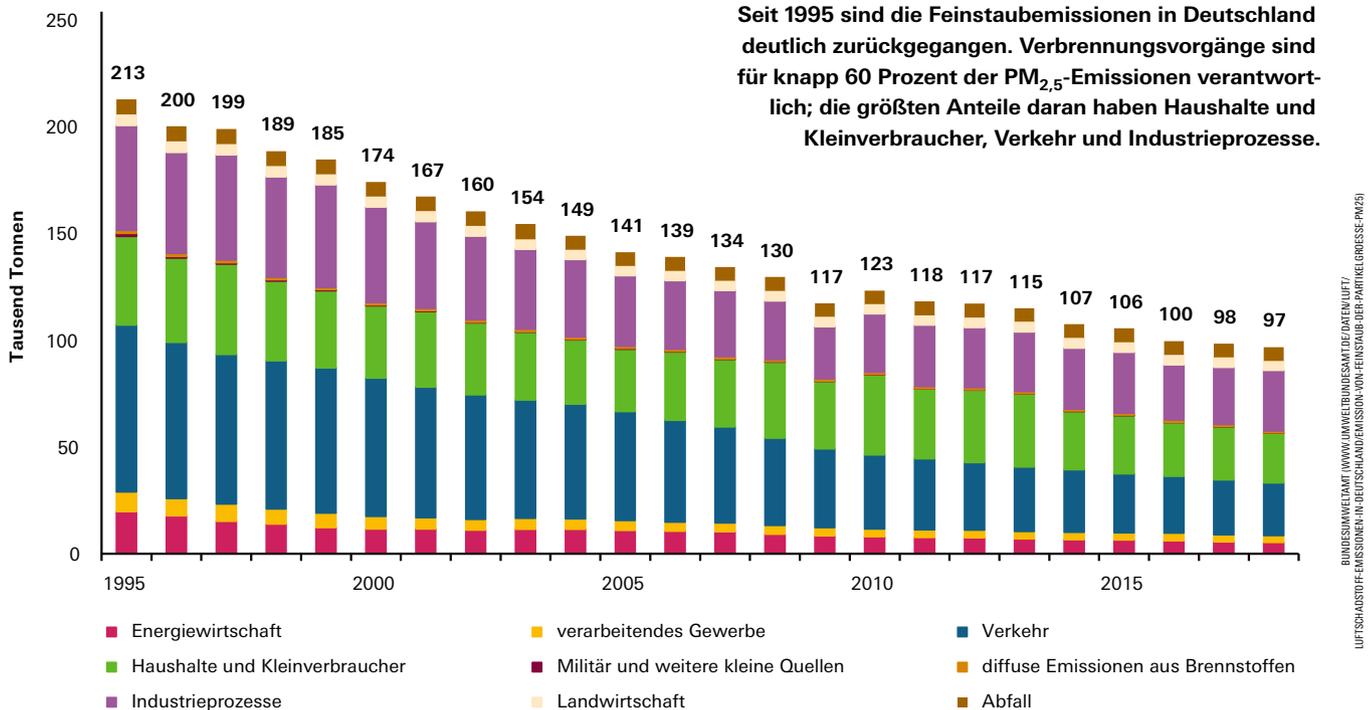


Forscher die Gesundheit von rund 131000 Londonern im Alter von 50 bis 79 Jahren über acht Jahre überwacht. Bei jenen, die der schlimmsten Luftverschmutzung ausgesetzt waren, zählten sie die meisten Demenzfälle. Besonders stark war der Zusammenhang zwischen Alzheimer und $PM_{2,5}$ -Partikeln. Eine Untersuchung mit fast 100000 Personen in Taiwan kam zu ähnlichen Ergebnissen. Wissenschaftler der University of Toronto wiederum analysierten Daten von 6,6 Millionen Menschen in der kanadischen Provinz Ontario. Personen, die in einem Umkreis von 50 Metern um eine Hauptverkehrsstraße wohnten, hatten ein zwölf Prozent höheres Demenzrisiko als jene, die mehr als 200 Meter entfernt wohnten.

Derartige Studien haben ihre Grenzen. Sie zeigen zwar auf, wenn zwei Faktoren – in diesem Fall Luftverschmutzung und Morbus Alzheimer – vermehrt gemeinsam auftreten. Sie können aber nicht belegen, ob und wie sie zusammenhängen. Dafür braucht es Untersuchungen, bei denen Organismen gezielt einem vermuteten Risikofaktor ausge-

setzt werden. Es wäre allerdings unethisch, Menschen zu bitten, sich wissentlich über Monate oder Jahre hinweg verschmutzter Luft auszusetzen. Doch nur mit Daten aus solchen kontrollierten Experimenten können Forscher feststellen, ob die Luftverschmutzung die Bewohner einer Region für Alzheimer anfälliger machen oder ob den gehäuftten Krankheitsfällen andere Faktoren zu Grunde liegen.

»In einer perfekten Welt würde jeder einen Luftverschmutzungsmonitor tragen, so dass wir in Echtzeit Daten über seine Schadstoffbelastung erhalten könnten«, sagt Weuve. »Wir leben aber nicht in einer perfekten Welt.« Deshalb arbeitet ihr Team mit Experten, die Modelle erstellen, um die Belastung in einer Region abzuschätzen. Das reicht allerdings nicht aus: Bei Alzheimer zählt die chronische, langfristige Einwirkung. »Wir verfügen noch nicht einmal über ein weltweites Register von Alzheimerpatienten, geschweige denn über genügend Ressourcen, um Menschen viele Jahre lang zu beobachten, bevor sie die Krankheit entwickeln.« In einigen Regionen der Welt ist die



Luftverschmutzung so schlimm, dass Menschen an Herzkrankheiten sterben, bevor sie jemals Symptome einer spät einsetzenden Alzheimerkrankheit ausprägen können.

Um den Zusammenhang genauer zu untersuchen, nutzen Wissenschaftler Tiermodelle. Mit ihrer Hilfe spüren sie auch biologischen Mechanismen nach, die den kognitiven Abbau bewirken könnten. Im Jahr 2015 pumpte ein Team um den Neurobiologen Colin Combs von der University of North Dakota verschmutzte Luft in Käfige mit genetisch identischen Mäusen. Die Forscher variierten dabei die Schadstoffkonzentration und die Dauer der Behandlung. Je höher die Belastung, desto mehr Schäden beobachteten sie bei den Tieren. »Unsere Daten stützen die Theorie, dass eine langfristige Belastung durch luftgetragene Feinstaubpartikel das Gehirn verändert und die Entwicklung einer frühen alzheimerähnlichen Pathologie fördert«, erläutert Combs. 2018 berichteten Wissenschaftler des Cedars-Sinai Medical Center in Los Angeles, Schwermetalle aus verschmutzter Luft würden nach nur wenigen Monaten in das Gehirn von Ratten eindringen. Die Stoffe aktivieren dort offenbar Gene, die neurodegenerative Prozesse und Krebs begünstigen.

Umweltverschmutzung schädigt Blutgefäße und erhöht so das Risiko für Alzheimer sowie andere Formen von Demenz. In der DNA vieler Menschen, bei denen sich eine Alzheimerkrankheit ausprägt, sind Genvarianten nachweisbar, die sie anfälliger für das Leiden machen. Luftverschmutzung könnte mit manchen von ihnen zusammenwirken und so eine Krankheitsentstehung begünstigen, erläutert die klinische Psychologin Margaret Gatz von der University of Southern California. Das Gehirn von Betroffenen würde dann schneller altern, und mehr ihrer Neurone würden absterben. »Es gibt Hinweise darauf, dass vaskuläre Risikofaktoren für Menschen mit der APOE4-Genvariante

gefährlicher sind als für Menschen ohne diese Variante«, erklärt sie. »Viele Untersuchungen haben sich jedoch auf das genetische Risiko der Krankheit konzentriert und die Lebensstil- und Umweltkomponente praktisch ignoriert.«

Das, was giftige Substanzen aus Feinstaub im Gehirn anrichten, deckt sich gut mit den Vorstellungen darüber, wie sich alzheimerbedingte Schäden entwickeln. Wie die Neurotoxikologin Deborah Cory-Slechta vom University of Rochester Medical Center darlegt, regen die Stoffe sowohl bei Tieren als auch bei Menschen Immunzellen im Gehirn, so genannte Mikroglia, dazu an, Zytokine freizusetzen. Diese Signalmoleküle helfen dabei, die Immunabwehr und Entzündungen zu steuern. Unter normalen Umständen schützt das unser Gehirn gegen Eindringlinge von außen.

Fatale Immunreaktion

Eine länger andauernde Belastung durch verschmutzte Luft kann zu einer Überproduktion von entzündungsfördernden Zytokinen und damit zu einer chronischen Entzündung führen, in deren Folge Nervenzellen absterben. »Ultrafeinstaub scheint der wichtigste Faktor in diesem Prozess zu sein«, merkt Cory-Slechta an.

Es sei allerdings schwierig zu bestimmen, welche Bestandteile der Partikel die Probleme bedingen. »Zum einen haben wir nur sehr wenige historische Daten darüber«, erklärt die Forscherin. Das erschwere es, die relative Konzentration der Schadstoffe in der Umwelt zu beurteilen. Zum anderen enthalten sie viele Komponenten, die sich kaum getrennt testen lassen. Feinstaub in Abgasen umfasst Hunderte von Substanzen, von Giftstoffen wie Schwefeldioxid und Stickoxiden bis hin zu lungengängigen Partikeln aus dem Abrieb von Bremsen, Reifen und Kupplungen von Kraftfahrzeugen.

Laut Cory-Slechta neigen die Luftschadstoffe dazu, sich über viele Jahre hinweg im Gehirn anzusammeln. Was genau

über die Lunge dorthin gelangt, sei noch nicht vollständig geklärt. Zudem sei fraglich, ab wann die Substanzen Probleme verursachen. »Eisen, Zink, Kupfer und andere Metalle werden vom Gehirn benötigt, jedoch nur in bestimmten Mengen«, erläutert sie. »Zu viel Eisen löst oxidativen Stress aus, der zu Neurodegeneration führen kann. Einige Schadstoffe wie Aluminium spielen keine wesentliche Rolle im Gehirn, neigen aber dazu, sich dort anzusammeln und eine Entzündungsreaktion hervorzurufen.« Nicht bloß Metalle sind problematisch. Auch organische Schadstoffe könnten an neurodegenerativen Erkrankungen beteiligt sein, so die Neurotoxikologin.

Hierzu zählen zum Beispiel Lipopolysaccharide. Ursprünglich stammen sie von Bakterien. Aus Abfallbehandlungsanlagen und anderen Quellen verteilen sie sich in der Umgebungsluft. Sie können sich an winzige Partikel anlagern und beim Einatmen eine Entzündungsreaktion in der Lunge hervorrufen. In Tierversuchen wiesen Wissenschaftler nach, dass Lipopolysaccharide und andere organische Stoffe mitunter ins Gehirn gelangen und dort Entzündungen und in der Folge Neurodegeneration auslösen.

Jiu-Chiuan Chen, ein Arzt und Epidemiologe an der University of Southern California, hat sich auf die Untersuchung von Luftschadstoffen im Gehirn spezialisiert. Obwohl noch strittig sei, wie die einzelnen Bestandteile wirken, trage die Mischung eindeutig zu Hirnschäden und kognitiven Problemen bei, erklärt er. Chen war Mitautor einer 2019 veröffentlichten Studie, die einen Zusammenhang zwischen der Feinstaubbelastung, strukturellen Veränderungen im Gehirn und Gedächtnisverlust bei älteren Frauen beschrieb. Er und seine Mitarbeiter analysierten Daten aus bildgebenden Verfahren und kognitiven Tests mit einem mathematischen Modell, das aus zwei verschiedenen Quellen Werte über die Luftqualität im Lebensumfeld der Probandinnen miteinbezog.

»Wir fanden heraus, dass das episodische Gedächtnis bei Frauen mit der höchsten Schadstoffbelastung früher nachließ«, erläutert er. Diese Art des Langzeitgedächtnisses erlaubt es Menschen, sich ein vergangenes Erlebnis wachzurufen – inklusive wo und wann es sich ereignete und welche Emotionen der Moment auslöste. Die Einbußen, die Chen bei den Frauen beobachtete, zeigten sich noch vor den Symptomen der Alzheimerkrankheit. Zudem waren die Effekte nicht vom Zustand des Herz-Kreislauf-Systems der Probandinnen abhängig. Menschen mit schwächlichem episodischem Gedächtnis haben erwiesenermaßen ein stark erhöhtes Risiko, an Alzheimer zu erkranken.

»Es gibt mehr als zehn Studien, die eine hohe Schadstoffbelastung im späteren Leben und Demenz miteinander in Verbindung bringen«, sagt Chen. »Die Belege sind ziemlich überzeugend.« Ob die Belastung in jungen Jahren ebenfalls ein Faktor ist, sei dagegen weniger klar. »Toxikologen führen bereits Versuche an jungen Tieren durch, und sie sehen krankhafte Veränderungen. Es scheint, als könnten kleine Partikel den Prozess der Plaquebildung beschleunigen. Bislang sind wir aber nicht sicher, ob dies auch beim Menschen geschieht.« Er fügt hinzu, dass es eine genetische Komponente geben könnte – der eine oder andere ist vielleicht deshalb anfälliger

für die Auswirkungen von Umweltverschmutzung. Möglicherweise existiert eine Untergruppe von Personen, die ein sehr hohes Risiko tragen. »Unsere aktuellen Studien sind noch nicht umfangreich genug, um diese Frage zu beantworten.«

Manche sehen in den bisherigen Erkenntnissen auch etwas Gutes: Sie bieten eine Möglichkeit, Maßnahmen zu ergreifen, um das Erkrankungsrisiko vieler Menschen zu verringern. Die Epidemiologin Melinda Power von der George Washington University untersucht veränderliche Risikofaktoren für kognitiven Verfall und Demenz. »Im Moment sieht es so aus, als sei Prävention durch die Veränderung von Umwelt- und Lebensstilfaktoren unsere beste Chance«, sagt sie, »und die Belastung durch Luftverschmutzung scheint besonders wichtig zu sein.«

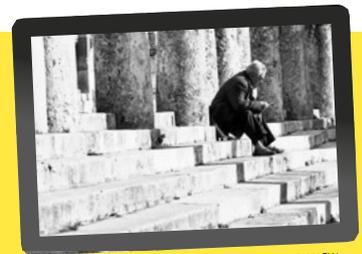
Risikominderung durch bessere Luft und körperliche Aktivität

Die Daten seien ein starkes Argument für strengere Kontrollen der Luftqualität, ergänzt die Epidemiologin Kelly Bakulski von der University of Michigan. »Im Gegensatz zu unseren Genen können wir Umweltfaktoren beeinflussen. Entfernen wir die Schadstoffe aus unserem Umfeld, wird das keine schädlichen, sondern vielmehr viele positive Auswirkungen haben«, erläutert sie.

Veränderungen in der Lebensweise helfen ebenso, das Krankheitsrisiko zu senken. »Körperliche Betätigung verringert nachweislich das Alzheimerisiko«, erklärt Margaret Gatz. Bewegung wirkt, indem sie die Durchblutung des Gehirns verbessert. Zudem steigert sie die Produktion eines Proteins namens BDNF, welches das Wachstum und den Erhalt von Gehirnzellen fördert. Man weiß um die Verwüstungen, die die Erkrankung anrichtet. Deshalb ist es an der Zeit, solche präventiven Maßnahmen zu ergreifen. »Wir haben die Mittel dazu«, sagt Bakulski, »und angesichts des Risikos müssen wir sie nutzen.« ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



RICHARD ZINKEN (SYMBOLBILD MIT FOTO MODELL)

QUELLEN

Calderón-Garcidueñas, L. et al.: Alzheimer's disease and alpha-synuclein pathology in the olfactory bulbs of infants, children, teens and adults ≤ 40 years in metropolitan Mexico City: APOE4 carriers at higher risk of suicide accelerate their olfactory bulb pathology. *Environmental Research* 166, 2018

Younan, D. et al.: Particulate matter and episodic memory decline mediated by early neuroanatomic biomarkers of Alzheimer's disease. *Brain* 143, 2020

Zhang, Z. et al.: Particulate matter air pollution, physical activity and systemic inflammation in Taiwanese adults. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 221, 2018

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

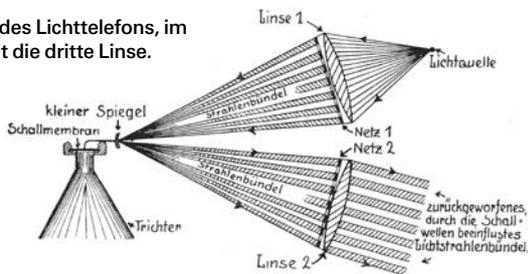
STERNENGUCKER: GEBLENDET VON VENUS' SCHÖNHIT 1920

»Die Venus bildet für Freunde der Himmelskunde einen beliebten Beobachtungsgegenstand. Und nicht selten erhält der Fachmann Zuschriften von Beobachtern, die »mit einem zwar kleinen, aber ganz vorzüglichen Fernrohr Polflecken und andere Gebilde auf der Venus gesehen haben wollen. Man nimmt an, daß die Lufthülle der Venus beständig von dichten weißen, im Sonnenlicht glänzenden Wolken erfüllt ist, weil der Planet viel Licht zurückwirft. Die Oberfläche käme uns daher überhaupt nicht zu Gesicht. Die Besitzer kleiner Fernrohre werden deshalb gut tun, bei Bekanntgabe solcher Beobachtungen stets Vorsicht walten zu lassen.« *Kosmos 11, S. 295*

MIT LICHT TELEFONIEREN

»Die Bemühungen, das Fernsprechwesen von Drahtleitungen unabhängig zu machen, erstrecken sich [auch auf die] Ausnutzung einer Lichtquelle. Der auf einem Schallblech angebrachte Spiegel (Abbildung) wirft das durch die Linse und das Netz 1 fallende Licht durch das Netz und die Linse 2. Wird in den Trichter gesprochen, so gerät der Spiegel durch die Schallwellen in Bewegung und das Licht kann durch Netz 2 nur noch teilweise hindurch. Je nachdem wird es auf die im Brennpunkte [einer dritten] Linse befindliche Selenzelle übertragen. Hierdurch entstehen Stromunterschiede, die den Schallwellen entsprechen. Die Wiedergabe: Jede Stimme ist erkennbar.« *Die Umschau 44, S. 640*

Aufbau des Lichttelefons, im Bild fehlt die dritte Linse.



90 PROZENT ALLER AUTOS IN NORDAMERIKA

»Nach einer Schweizer Statistik beträgt die Zahl der in der ganzen Welt im Verkehr befindlichen Automobile nicht weniger als 8775000 Wagen. An der Spitze stehen die Ver. Staaten mit 7550000. Dann folgt Kanada mit 337000. England besitzt 255000, Frankreich 202000, Deutschland 75000, Schweiz 16000. In Amerika entfällt auf jede 15. Person ein Wagen, in England auf jede 180., in Frankreich auf je 200, in der Schweiz auf 230 und in Deutschland auf 870 Einwohner.« *Technische Monatshefte 11, S. 288*

TROCKENGEBIETE MIT EISBERGWASSER VERSORGEN 1970

»Auf [einem] Symposium erörterten zwei Wissenschaftler die Möglichkeiten, schwimmende Eisberge an die Küsten von Trockengebieten zu ziehen, um sie dort für die Wassergewinnung zu nutzen. Die Wissenschaftler wiesen darauf hin, daß in der Antarktis ausgedehnte Eisvorkommen für das Unternehmen vorhanden sind. Mit Hilfe von Satelliten-Aufnahmen [könnte es] gelingen, Eisberge in fast jeder gewünschten Form und Größe auszuwählen. Danach könnten Schleppschiffe in die entsprechenden Gebiete eingewiesen werden.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 11, S. 476*

IM HERBST ROTIERT DIE ERDE SCHNELLER

»Eine neue Atomuhr von den sowjetischen Physikern Nikolas Bassow und Alexander Prokhorow soll zehntausendmal genauer gehen als sämtliche bisher bekannten Instrumente der Zeitmessung. Mit ihrer Hilfe konnte festgestellt werden, dass sich die Erde nicht mit gleichbleibender Geschwindigkeit um ihre Achse dreht; im Frühjahr dreht sie sich etwas langsamer und im Herbst entsprechend schneller. Ausserdem soll der Wechsel von Tag und Nacht in jeweils drei Jahren um 0,000043 Sekunden schneller vorstatten gehen, so dass unsere Erdentage entsprechend kürzer sind.« *Neuheiten und Erfindungen 404, S. 202*

FERNSEHEN RAUBT FREIZEIT UND SCHLAF

»Das Fernsehen in der Bundesrepublik ist für 56,3% eine Freizeitbeschäftigung neben anderen. Es gibt keine vergleichbare Betätigung, für die freiwillig so viel Zeit aufgewendet wird. Der Fernseh-Teilnehmer schläft im Jahr durchschnittlich 3000 Stunden, arbeitet 2000 Stunden und sieht 1000 Stunden fern. In den letzten 17 Jahren [hat sich] aufgrund des Fernsehens das Zubettgehen um eine Stunde verschoben hat, während man immer noch zur gleichen Zeit aufsteht.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 11, S. 478*

WO PRODUZIERT DAS MEER BIOMASSE?

»Wie auf dem Lande, so ist in den Weltmeeren die Photosynthese der grundlegende Prozeß. Meeresflächen sind daher potentiell für die Ernährung nutzbare Gebiete. Spektralmessungen des von den oberen Meeresschichten reflektierten Lichtes von einem Flugzeug aus haben ergeben, daß ein Ansteigen des Chlorophyllgehaltes sich mit der Zunahme des Grünanteils und der Abnahme des Blauanteils im Spektrum direkt korrelieren läßt. Es bleibt zu hoffen, daß die Messungen zukünftig automatisch von Satelliten durchgeführt werden können.« *Die Umschau 24, S. 792*



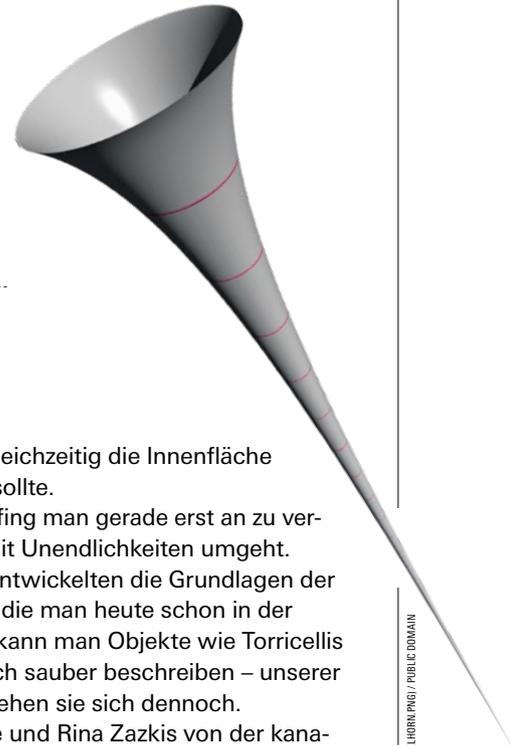
FRANK SCHÄPEL (GERMAN FREISTETTER DE PRESSE) / CC BY-SA 4.0 (REACTICOMMONS ORIGINALS/FR-SA/4.0/LEGAL/0001)

FREISTETTERS FORMELWELT DIE UNMÖGLICHE TROMPETE

Mit der Unendlichkeit kann man wunderbar rechnen. Wenn wir aber anschaulich darüber nachdenken, scheitern wir meist.

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

► spektrum.de/artikel/1773735



Das 17. Jahrhundert war eine Zeit voller wissenschaftlicher Revolutionen. Galileo Galilei richtete das gerade erst erfundene Teleskop auf den Himmel, Johannes Kepler erklärte die Bewegung der Planeten, Isaac Newton schuf eine neue Physik. Und der italienische Physiker Evangelista Torricelli konstruierte 1641 eine völlig unmögliche Trompete.

Dabei handelt es sich nicht um ein echtes Musikinstrument, sondern um handfeste Mathematik. Torricelli untersuchte damals eine rotierende Hyperbel: Angenommen, man dreht die durch die Funktion $y = 1/x$ – für x größer gleich 1 – gebildete Kurve um die x -Achse. Welches Volumen hat der entstehende Körper dann? Die Größe berechnet sich durch folgendes Integral:

$$V = \pi \int_1^{\infty} \left(\frac{1}{x}\right)^2 dx = \pi$$

Das Ergebnis ist also eine endliche Zahl. Überraschenderweise ist die Oberfläche des Rotationskörpers dagegen unendlich groß. Das Resultat Torricellis scheint paradox: Die Form, die er entdeckt hatte, gleicht einer lang gestreckten Trompete, deren Ende bis ins Unendliche reicht und dabei immer dünner wird. Obwohl das Objekt unendlich lang ist und eine unendlich große Oberfläche hat, ist das Volumen endlich.

Das erstaunte damals nicht nur ihn, sondern auch die restlichen Wissenschaftler. Man zweifelte sogar an der Mathematik. Und tatsächlich verwirrt das Objekt, das die Bezeichnung »Torricellis Trompete« (oder »Gabriels Horn«) trägt, die Menschen bis heute.

Das »Painter's Paradox« verdeutlicht den vermeintlichen Widerspruch: Um die unendlich große Innenfläche der Trompete zu bemalen, bräuchte man ja wohl unendlich viel Farbe. Andererseits kann man das endliche Volumen des Körpers mit einer endlichen Menge

Farbe füllen – womit gleichzeitig die Innenfläche komplett gefärbt sein sollte.

Zu Torricellis Zeiten fing man gerade erst an zu verstehen, wie man mit Unendlichkeiten umgeht. Newton und Leibniz entwickelten die Grundlagen der Infinitesimalrechnung, die man heute schon in der Schule lernt. Dadurch kann man Objekte wie Torricellis Trompete mathematisch sauber beschreiben – unserer Vorstellungskraft entziehen sie sich dennoch.

Chanakya Wijeratne und Rina Zazkis von der kanadischen Simon Fraser University haben das Problem 2015 untersucht (»On Painter's Paradox: Contextual and Mathematical Approaches to Infinity«) und eine Gruppe von Studierenden sowohl mit den korrekten Berechnungen der Trompete als auch mit dem Paradox konfrontiert. In einer Reihe von Interviews haben die Forscher die Reaktionen der Probanden analysiert.

Vielen ging es wie den Gelehrten des 17. Jahrhunderts: Sie glaubten nicht an die seltsamen Eigenschaften des Körpers. Einige versuchten, das Paradox durch einen realen Bezug zu lösen: Um die Fläche zu färben, bräuchte man unendlich viel Zeit, weswegen das Vorhaben unmöglich sei. Oder man würde irgendwann vor dem Problem stehen, einzelne Atome zu bemalen.

In solchen Antworten liegt die Ursache der Probleme. Unendlichkeiten befinden sich außerhalb unserer Vorstellungskraft. Wenn wir versuchen, sie durch reale Objekte zu verstehen, scheitern wir. Es ist beispielsweise durchaus möglich, eine unendliche Fläche mit endlich viel »mathematischer« Farbe zu bemalen: Die Farbschicht muss nur ausreichend schnell immer dünner werden – was echte Farbe aber nicht kann.

Glücklicherweise ließen sich die Mathematiker des 17. Jahrhunderts von diesem Paradox nicht allzu sehr entmutigen. Mit der erwähnten Infinitesimalrechnung schufen sie in den folgenden Jahren ein Instrument, das weit über die menschliche Vorstellungskraft hinausgeht.

ROCKEHRD (COMMONS/WIKIMEDIA ORIGINALS/FR-SA/4.0/LEGAL/0001)

SONNENSYSTEM PLUTOS DUNKLE SEITE

Lang ersehnte Bilder von der Rückseite des Zwergplaneten zeigen Pluto in neuem Licht. Unter anderem verdichten sich die Hinweise auf flüssiges Wasser auf der eiskalten Welt.



Shannon Hall ist Astrophysikerin und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin im US-Bundesstaat Colorado.

» [spektrum.de/artikel/1773714](https://www.spektrum.de/artikel/1773714)



Dreieinhalb Stunden nach ihrem Vorbeiflug an Pluto drehte sich die Raumsonde New Horizons um und machte Bilder der sonnenabgewandten Seite, die zu dieser Zeit im Dunkeln lag. Tage vor der Annäherung an den Zwergplaneten schien dagegen die Sonne auf die Hemisphäre, was die Sonde für Fernaufnahmen nutzte.

AUF EINEN BLICK ZWERGPLANET ALS WUNDERTÜTE

- 1** Erst jetzt ausgewertete Fernaufnahmen der Raumsonde New Horizons zeigen die Seite Plutos, die am Tag des Vorbeiflugs im Dunkeln lag. Trotz geringer Auflösung sind auf ihnen neue Details erkennbar.
- 2** Die Bilder stützen alte Theorien über den Zwergplaneten, etwa die von einem verborgenen Ozean unter der Kruste, oder von der Entstehung der herzförmigen Region Sputnik Planitia.
- 3** Gleichzeitig werfen die Bilder Fragen auf. So prägen gewaltige, klingenförmige Bergrücken Plutos Oberfläche, bei denen unklar ist, wie sie entstanden sind.

Als die NASA-Raumsonde New Horizons im Juli 2015 an Pluto vorbeiflog, waren ihre Bilder eine große Überraschung. Zu sehen war eine wesentlich dynamischere und vielseitigere Welt, als Wissenschaftler sich im Vorfeld erträumt hatten. Auf Pluto ragen nicht nur Klippen aus gefrorenem Stickstoff wie zerklüftete Fjorde in die Höhe, sondern auch Blöcke aus Methaneis, teils so hoch wie Wolkenkratzer. Die Oberfläche des Zwergplaneten durchziehen außerdem Risse, die tiefer sind als der Grand Canyon, während mancher Eisvulkan sogar den Mount Everest in den Schatten stellt.

Und dann ist da natürlich noch das riesige herzförmige Gebiet auf der einen Seite des Zwergplaneten, das Raumfahrtenthusiasten in den Tagen nach New Horizons' Vorbeiflug in Entzücken versetzte. »Ich hatte zwar erwartet, dass Pluto ein Paradies für Wissenschaftler ist«, sagt New-Horizons-Teammitglied Leslie Young vom Southwest Research Institute in Boulder, Colorado. »Aber wer hätte gedacht, dass er so schön ist?«

Der erste Blick auf Pluto liegt mittlerweile knapp fünf Jahre zurück, doch Forscher wie Young haben seitdem immer wieder neue Aufnahmen der fernen Welt zu sehen bekommen. Als die NASA-Sonde den Zwergplaneten erreichte, bewegte sie sich mit 52 000 Kilometern pro Stunde – so schnell, dass sie nur eine Seite von Pluto aus

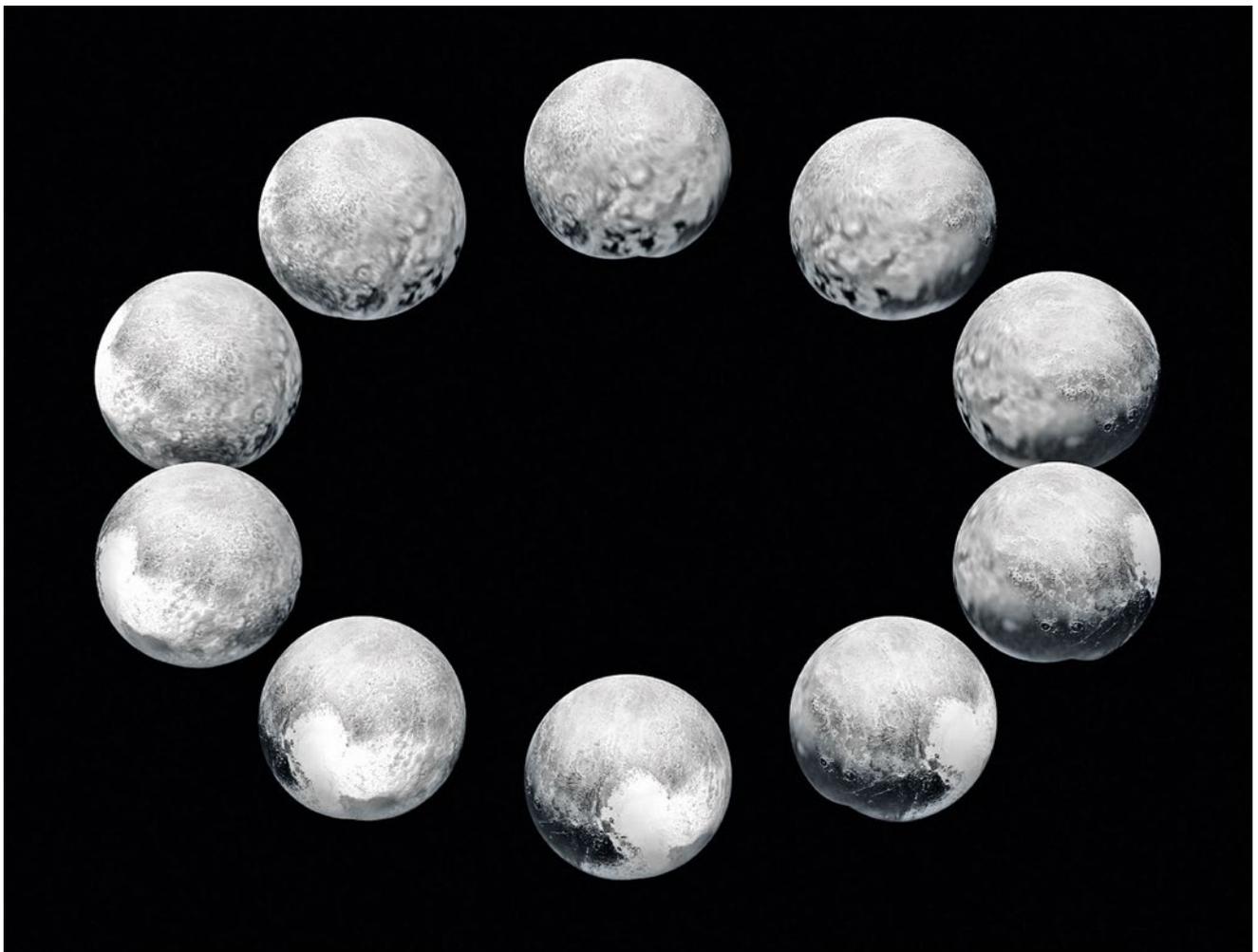
Bei Anflug auf Pluto bekam die Menschheit nacheinander alle Seiten des Zwergplaneten zu sehen – teils in niedriger Auflösung (oben), teils in hoher (unten).

der Nähe fotografieren konnte. Es war die Hemisphäre, die zu dieser Zeit von der Sonne beschienen wurde. Die andere lag dagegen im Schatten und war für New Horizons nur Tage vor der größten Annäherung sichtbar.

Nachdem Wissenschaftler in den ersten Jahren vor allem die Nahaufnahmen ausgewertet haben, steht mittlerweile diese »ferne« oder »dunkle« Seite von Pluto im Fokus. Die Bilder sind hier nicht so scharf wie die später geschossenen, auf denen man Strukturen mit einer Größe von etwa 75 Metern sehen kann. Die Aufnahmen der dunklen Seite lassen aber immerhin Gelände mit einer Auflösung von 2 bis 30 Kilometern erkennen. Das klingt grob, ist jedoch bis zu 75-mal besser als die Bilder, die Astronomen im Vorfeld der Mission mit dem Hubble-Weltraumteleskop aufgenommen hatten. »Es sind immer noch wirklich gute Daten«, bekräftigt New-Horizons-Forscher Harold Weaver von der Johns Hopkins University in Baltimore. »Und es sind die besten, die wir im Lauf der nächsten 30 bis 40 Jahre haben werden.«

Die Bilder der fernen Seite – insgesamt hunderte – erlauben einen neuen Blick auf Pluto. Sie helfen zum Beispiel dabei, die Entstehung des Zwergplaneten besser zu verstehen und die Frage zu beantworten, ob sich unter Plutos eisiger Kruste ein Ozean verbirgt. Je nach Auslegung stützen die Daten sogar die Annahme, dass es lebensfreundliche Nischen auf der extrem kalten Welt geben könnte.

Gleichzeitig werfen die Bilder eine Reihe von Fragen auf. So gingen Forscher lange davon aus, wolkenkratzerähnliche Eistürme gäbe es nur auf der nahen Seite. Doch ganz offensichtlich haben sie sich auch auf der fernen Hemisphä-





Wer genau hinsieht, kann hier in der rechten Bildhälfte Regionen ausmachen, die wie fein getupft wirken. Sie bestehen aus kilometerhohen, scharfkantigen Berg Rücken aus Methaneis und werden »Klingen«-Gebiet genannt.

re gebildet und scheinen Pluto in einer Art Band zu umgeben. Das macht ihre Herkunft zu einem der Mysterien des Zwergplaneten.

Von all dem konnte der junge US-Astronom Clyde Tombaugh noch nichts ahnen, als er Pluto vor 90 Jahren am Lowell-Observatorium in Flagstaff, Arizona, entdeckte. Die Welt zeigte sich Tombaugh als Lichtfleck, der selbst für die damals größten bodengebundenen Teleskope kaum sichtbar war. Erst 1988 erfuhren Wissenschaftler mehr über ihn, als Pluto zufällig vor einem fernen Stern vorüberzog.

Da das Sternlicht dabei von Plutos Atmosphäre gefiltert wurde, konnten Astronomen Moleküle wie Methan und Stickstoff darin identifizieren. 1996 lieferte das Hubble-Weltraumteleskop erste Details der Oberfläche, allerdings nur mit einer Auflösung von rund 150 Kilometern. Auf den unscharfen Bildern war jedoch bereits zu erahnen, dass es sich um eine überraschend kontrastreiche Welt handelt.

Ein Becken, durch das Gletscher fließen

Der Vorbeiflug von New Horizons am 14. Juli 2015 bestätigte diesen Eindruck dann deutlich. Zunächst sprang den Forschern dabei das herzförmige Merkmal nördlich des Äquators ins Auge. In der linken Ausstülpung der Formation liegt ein Becken, durch das gewaltige Gletscher zu fließen scheinen. Heute wissen Wissenschaftler: Die als Sputnik Planitia bekannte Region übt einen großen Einfluss auf das Klima des Zwergplaneten aus. Wenn das Licht der fernen Sonne die gefrorene Ebene erwärmt, sublimiert ein Teil des Eises zu Dampf, der nach oben schwebt und sich am Ende eines Pluto-Tages erneut niederlässt.

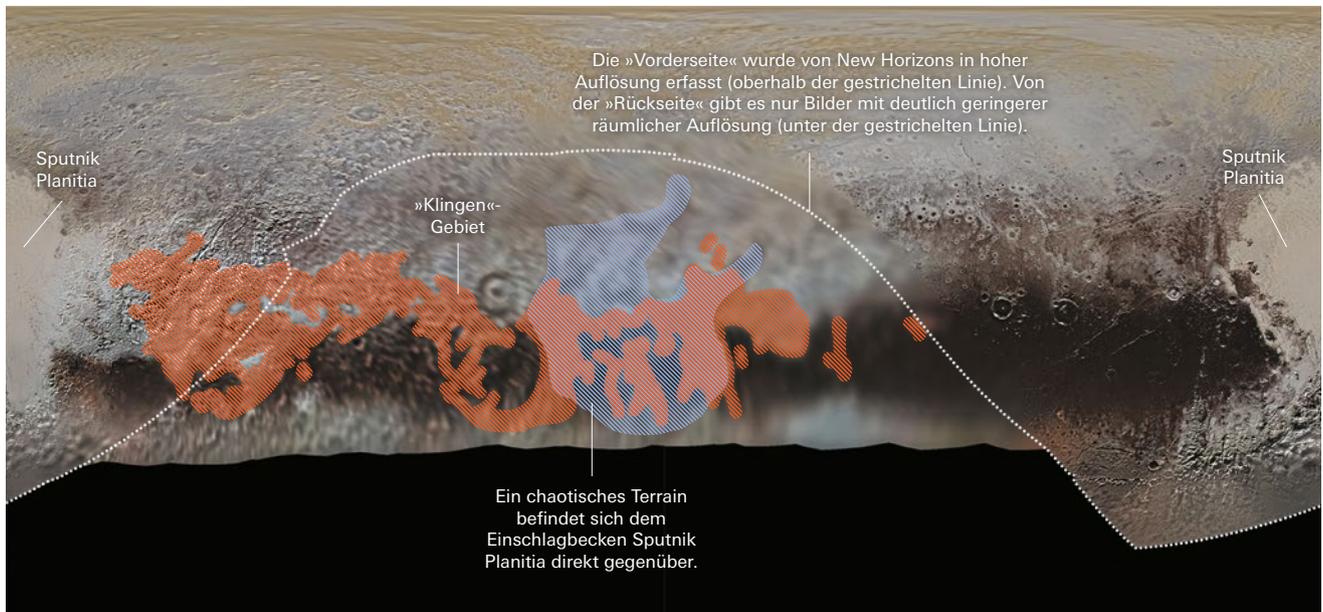
Vielleicht hat die herzförmige Region sogar die Orientierung des Zwergplaneten verändert. Dafür spricht jedenfalls die besondere Lage von Sputnik Planitia. Die Ebene befin-

det sich fast genau gegenüber von Plutos größtem Mond Charon, der in starrer Rotation um den Zwergplaneten kreist. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zufällig zu dieser Konfiguration kommt, liegt Modellen zufolge bei nur fünf Prozent.

Stattdessen könnte das Becken Pluto gewissermaßen in seine heutige Orientierung gezwungen haben: Als sich die Senke von Sputnik Planitia bildete – möglicherweise durch den Einschlag eines großen Himmelskörpers –, hätte der unterirdische Ozean, den Forscher auf Pluto vermuten, die Vertiefung rasch gefüllt. Anschließend wäre auch Stickstoffgas aus der Atmosphäre in dem Tiefland kondensiert und dort nach kurzer Zeit gefroren. Das Gewicht von Wasser und Eis hätte Pluto an der Stelle eine Art Unwucht verliehen und den Himmelskörper bei seiner Rotation in diese Richtung kippen lassen.

Experten glauben schon seit Jahren, dass Pluto ein gigantisches unterirdisches Reservoir flüssigen Wassers beherbergt. Die Bilder von der dunklen Seite liefern nun neue Indizien dafür. Zentral für die Theorie ist ein Teil des Zwergplaneten, den Forscher in Ermangelung eines besseren Namens »chaotisches Terrain« nennen. Gemeint ist ein verworrenes Durcheinander von Bergrücken, Gräben und Ebenen auf der Seite, die Sputnik Planitia genau gegenüberliegt.

Wissenschaftler haben solche Anordnungen schon auf anderen Welten gesehen, etwa auf dem Mars, Merkur und dem Jupitermond Europa. Dort gehen Experten jeweils davon aus, dass eine Kollision mit einem Asteroiden oder Kometen seismische Wellen um den Himmelskörper gejagt hat. Wenn die Beben dann am gegenüberliegenden Horizont aufeinandertreffen, reißt die Oberfläche auf und hinterlässt womöglich eine wild zerklüftete Landschaft – wie die



Auf diesem zusammengesetzten Bild sind beide Hemisphären von Pluto zu sehen: Oben die schärfer fotografierte »nahe« Hälfte, unten die »ferne«.

auf der dunklen Seite von Pluto. Um den Ursprung des chaotischen Terrains zu untersuchen, hat Adeene Denton von der Purdue University in Indiana simuliert, wie ein Asteroideneinschlag Schockwellen über den Zwergplaneten senden würde. Demnach könnte die Landschaftsform tatsächlich auf solch ein gewaltiges Ereignis zurückgehen. Aber auch hier benötigt Pluto einen unterirdischen – in diesem Fall 150 Kilometer dicken – Ozean, damit die Sache aufgeht.

Ob das chaotische Terrain wirklich auf einen großen Einschlag auf der gegenüberliegenden Seite zurückzuführen ist, ist allerdings noch unsicher. Oliver White vom SETI-Institut in Mountain View hält die Auflösung der Bilder für zu gering, um die Region abschließend zu beurteilen und mit anderen Formationen im Sonnensystem vergleichen zu können. »Wir werden hier nichts Finales sagen können, bis wir eines Tages zu Pluto zurückkehren«, findet auch William McKinnon von der Washington University, der stellvertretende Leiter des Geologenteams von New Horizons.

Fest steht, dass Pluto mehrere Besonderheiten aufweist, die man im Sinn eines verborgenen Ozeans interpretieren kann. Lange gingen Forscher davon, dieser müsste nach Plutos Entstehung rasch festgefroren sein. Erst später wäre die Eismasse geschmolzen, da sich der felsige Kern des Zwergplaneten durch den Zerfall radioaktiver Elemente erwärmte.

Dabei wäre das Eis zusammengezogen worden, was zu Falten auf der Oberfläche geführt hätte – ähnlich jenen, die auf einem Apfel nach einer Weile im Kühlschrank entstehen. Beim erneuten Gefrieren hätte sich das Wasser dann wieder ausgedehnt und so die Oberfläche hier und da aufreißen lassen. Bilder der Pluto-Oberfläche sollten also

alte Falten und vergleichsweise junge Risse zeigen. New Horizons hat jedoch nur Risse fotografiert. Das deutet eher darauf hin, dass der Ozean des Zwergplaneten als Flüssigkeit begann und erst im Lauf der Zeit in Teilen gefroren ist.

Insbesondere die Bilder der fernen Seite zeigen eine riesige Fraktur, die sich bis auf die nahe Seite von Pluto erstreckt. Er scheint über den Nordpol und auf der fernen Seite zurück zum Südpol zu verlaufen und so den gesamten Zwergplaneten zu umschließen (siehe Bild S. 50). Die Verwerfung ähnelt damit dem ostafrikanischen Grabensystem, das den Subkontinent in zwei Teile spaltet.

Auf Pluto kann jedoch nicht wie auf der Erde Plattentektonik die Ursache sein. Stattdessen könnte die Narbe auf den zufrierenden Ozean zurückgehen, der sich dabei immer weiter ausgedehnt und so die Kruste des Zwergplaneten unter Spannung gesetzt hat. Da der lange Spalt extrem alt ist, wäre Plutos Meer in dem Fall vermutlich gleich nach seiner Entstehung erkaltet.

Ein Fall für Astrobiologen

Sollte der Ozean noch immer in Teilen flüssig sein, könnte er vielleicht sogar einfachen Organismen einen Lebensraum bieten. Manche Stellen auf Plutos naher Seite sehen jedenfalls so aus, als sei dort Wasser an die Oberfläche geschwemmt worden. Zudem sind diese Bereiche rötlich verfärbt, was man als Indiz für organische Moleküle deuten kann. Sie gelten als Vorbedingung für Leben und könnten zum Beispiel durch den Sonnenwind oder kosmische Strahlung entstanden sein. Für diese Theorie sprechen zumindest Laborexperimente, in denen sich komplexe, rötlich-braune organische Verbindungen bilden, wenn man Stickstoff, Methan oder Wasser mit Strahlung bombardiert. Wenn Ammoniak vorhanden ist, können sogar jene Basen entstehen, die in RNA und DNA vorkommen.

Was sich abenteuerlich anhört, wird von den Wissenschaftlern ernsthaft diskutiert. So hat ein Team um New-Horizons-Wissenschaftler Dale Cruikshank in der Zeitschrift »Astrobiology« 2019 einen Fachaufsatz zu Leben auf Pluto

veröffentlicht. Laut den präsentierten Indizien ist das Nahseiten-Eis rot und enthält Ammoniak. Das bedeute aber noch lange nicht, dass auf Pluto auch wirklich Leben entstanden ist, betont Cruikshank. Vielmehr könnten den Ergebnissen zufolge einfache Organismen dort überleben. Dennoch findet die Theorie unter Planetenwissenschaftlern einigen Anklang. »Ich hätte vor dem Vorbeiflug niemals erwartet, dass es ein Artikel über Pluto in ›Astrobiology‹ schafft«, sagt etwa Cathy Olkin aus dem New-Horizons-Team.

Bilder von Plutos dunkler Seite stützen aus Sicht der Forscher die Theorie von organischem Material. Sie zeigen ein rotes Band, das sich über den Äquator erstreckt. Es verläuft dort, wo das meiste Sonnenlicht hinfällt und wo das Klima am wärmsten sein dürfte. Für New-Horizons-Chef Alan Stern vom Southwest Research Institute in San Antonio sind somit bereits zwei von drei Kriterien für Leben erfüllt: »Es gibt ziemlich deutliche Hinweise auf flüssiges Wasser. Und nun auch Daten, die für organische Stoffe sprechen«, resümiert er. Damit fehle bloß noch eine geeignete Energiequelle, um lebenskompatible Bedingungen zu erhalten.

Die Messungen auf Plutos dunkler Seite haben nicht nur dazu beigetragen, das Potenzial des Zwergplaneten für Leben zu erforschen, sondern ebenfalls eine Reihe von Fragen aufgeworfen. Als die ersten Bilder von New Horizons die Erde erreichten, fiel den Wissenschaftlern ein bizarres Gelände aus Eisklingen entlang der östlichsten Region der nahen Seite auf (siehe Bild S. 47). Diese gleichmäßig verteilten Bergrücken sind nur wenige Kilometer voneinander entfernt, ragen jedoch scharf und messerartig in den Himmel. Dabei erreichen sie gelegentlich eine Höhe von bis zu einem Kilometer, etwa dreimal so hoch wie das Empire State Building in New York City.

Bilder von der fernen Seite des Zwergplaneten sind verschwommen. Dennoch lässt sich »chaotisches« Terrain aus Schluchten und Ebenen erkennen.

PUNTO EN EL PLANETA / STOCKADOBEE.COM



Auf Pluto könnte Methaneis ähnliche Formen bilden wie Büßereis in den Anden (oben), allerdings in einem viel größeren Maßstab.

Die besondere Region war nicht mehr als ein Einzelfall, bis die Wissenschaftler einen Blick auf die andere Seite warfen. Die Aufnahmen von dort sind zwar zu ungenau, um einzelne Grate zu erkennen. Dennoch kann man auf ihnen sehen, dass ein Terrain aus Eisklingen die gesamte sonnenabgewandte Seite umspannt und am westlichen Rand der nahen Seite wieder auftaucht – in einer Region, der Forscher zuvor nicht viel Beachtung geschenkt hatten. »Da es sich um einen so weit verbreiteten Geländetyp handelt, ist es sehr wichtig, die Hintergründe zu verstehen«, sagt Stern.

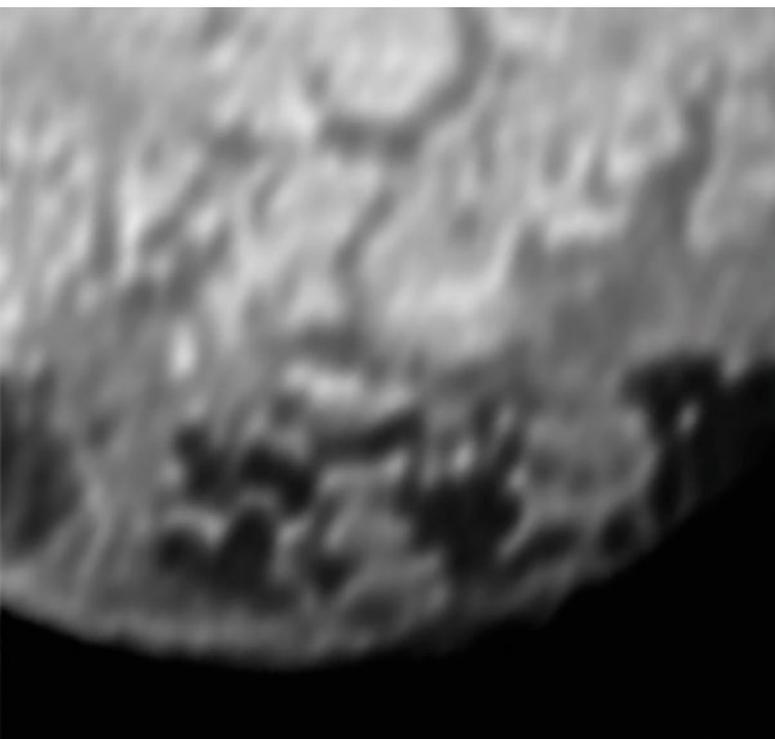
Spektralanalysen der Bilder zeigen: Die Klingen bestehen aus Methaneis und spannen einen Gürtel um den gesamten Äquator, zumindest auf Hochebenen und Bergen. Doch wie sie sich bilden konnten, bleibt ein Rätsel. Eine Möglichkeit wäre, dass Methan aus der Atmosphäre festgefroren ist und sich in dieser Form angehäuft hat, ähnlich wie Frost auf der Erde. Oder aber die Klingen sind Überreste einer alten Methaneisschicht, deren Zwischenräume durch das gleißende Sonnenlicht abgetragen wurden.

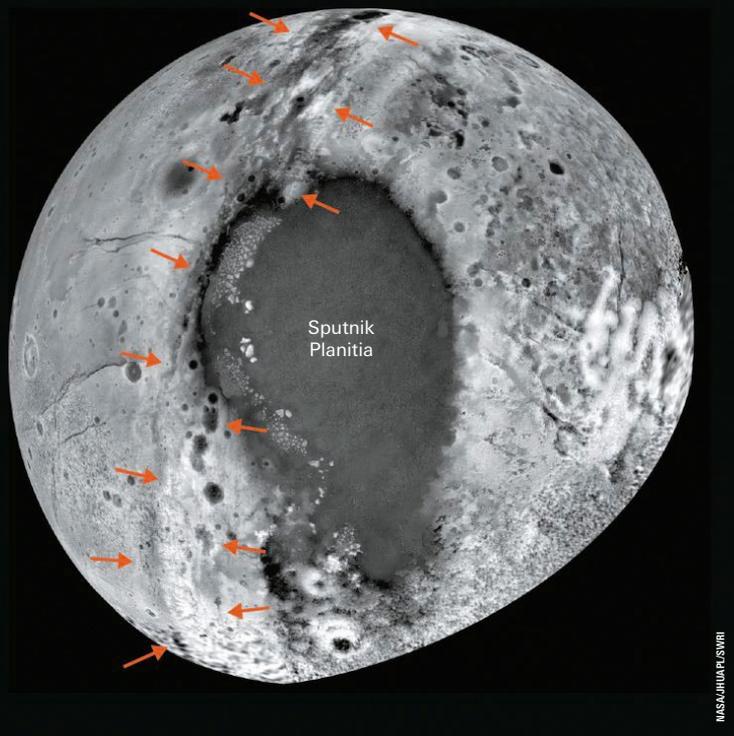
Einige Forscher haben sich auf letztere Erklärung konzentriert, weil die scharfen Grate Strukturen ähneln, die sich in den Anden formen, wenn auch in einem radikal kleineren Maßstab. Die südamerikanische Version der Klingen, die so genannten Penitentes (Büßereis), sind nur wenige Meter hoch und bilden sich im südamerikanischen Hochgebirge. Da sie zur Sonne hingeneigt sind und entlang des Äquators vorkommen, wo die Sonneneinstrahlung am stärksten ist, scheint Licht eine wichtige Rolle zu spielen.

Eine ähnliche Theorie für die Strukturen auf Pluto haben Jeffrey Moore vom NASA-Forschungszentrum Ames und seine Kollegen 2017 ausgearbeitet. Allerdings sind damit wohl nicht alle Eigenschaften der Eisklingen auf Pluto erklärbar. Obwohl einige von ihnen der Bahn der Sonne über dem Pluto-Himmel folgen, sind andere senkrecht dazu ausgerichtet, was gegen die Erosion durch Sonnenstrahlen spricht. Andererseits hat auch der Methanfrost als Erklärung Probleme, da er nicht solch helles Material hinterlässt.

Klar ist, dass man die eisigen Klingen (und die Landschaft von Pluto im Allgemeinen) nicht verstehen kann, ohne das Wetter des Zwergplaneten genau zu studieren.

NASA/JHUAPL/SVR





Ein langer Riss umspannt Pluto. Er entstand möglicherweise, als der unterirdische Ozean gefror und die Kruste des Zwergplaneten aufsprengte.

Erst 2019 haben Forscher ein Klimamodell veröffentlicht, wonach sich Methan in höheren Lagen anreichert, während sich Stickstoff eher in der niedrigen Atmosphäre konzentriert. Das würde erklären, warum das Becken von Sputnik Planitia reich an Stickstoffeis ist, die höher gelegenen Klingenregionen hingegen von Methaneis dominiert werden.

Auf der Erde ist das anders: Dort füllt flüssiges Wasser die tief liegenden Ozeane, und Wassereis bedeckt die höchsten Berggipfel. Das liegt auch daran, dass sich Wind auf unserem Planeten hangaufwärts bewegen kann und Wasser von Meereshöhe in die Berge transportiert. Auf Pluto ist das nicht möglich. Da seine Atmosphäre wärmer als die Oberfläche ist, dominieren Abwärtswinde. Der Stickstoff in den Niederungen kann dadurch niemals die höchsten Gipfel erreichen. Und Methan aus höheren Schichten kondensiert zunächst auf den Berggipfeln und schafft es somit seltener in Senken und Täler.

Was die Klingenformationen angeht, so scheinen sie über einen langen Zeitraum gewachsen zu sein. Eis sollte sich erst nach vielen Dutzend Millionen Jahren zu derart hohen Gebilden aufgehäuft haben. Auch erstrecken sie sich über viele Breitengrade. Das spricht dafür, dass sich die Klimazonen im Lauf der Zeit verschoben haben, was möglicherweise sogar zur Entstehung der Formationen beigetragen hat.

Pluto hat geradezu exzentrische Jahreszeiten. Auf der Erde wird der Jahreszeitenzyklus bekanntlich durch die Neigung der Rotationsachse zur Sonne bestimmt und nicht durch die Umlaufbahn des Planeten. Auf Pluto dagegen hat auch der Abstand zur Sonne einen großen Einfluss: Der Zwergplanet bewegt sich auf einer elliptischen Bahn und

umrundet die Sonne alle 248 Jahre einmal. Dabei gelangt er zeitweise an den eisigen Rand des Sonnensystems. Anschließend driftet er wieder zurück in Richtung Sonne, wobei sich der Abstand zu ihr um ein Drittel verringert.

Da sich Neigung der Drehachse und Distanz zur Sonne ständig ändern, erreicht jede Region auf Plutos Oberfläche nur alle 900 000 Jahre das Maximum der möglichen Sonneneinstrahlung. Solch ein »Supersommer« könnte auch eine Rolle bei der Bildung der Eistürme gespielt haben. Noch lässt sich dies aber nicht sicher nachweisen, da die Berechnung der Bahnparameter über die letzten zehn Millionen Jahre sehr anspruchsvoll ist.

Die lange Vorfreude auf einen neuen Besuch

Es ist eine der offenen Fragen, die künftige Studien angehen müssen. Derzeit versuchen Wissenschaftler, Plutos Vergangenheit und so seine Jahreszeiten besser zu verstehen – und durch den Vergleich der verschiedenen Regionen möglicherweise sogar Veränderungen vorherzusagen. Damit ließe sich vielleicht eine Prognose erstellen, was man in 50 Jahren erwarten sollte, wenn eine zukünftige Forschungssonde Pluto erreicht und in einen Orbit um den Zwerg einschwenkt.

In der Tat argumentieren viele Planetenforscher, dass ein erneuter Besuch fast unvermeidlich ist, angesichts der vielen offenen Fragen, die New Horizons aufgeworfen hat. Einige Experten ergründen daher gerade die Machbarkeit eines Orbiters, der den gesamten Zwergplaneten detailliert kartografieren und über längere Zeit begleiten könnte. Eine Mission nach diesem Schema würde jedoch wahrscheinlich erst in den 2030er oder sogar 2040er Jahren starten. Und das auch nur, wenn sich die NASA entscheidet, die Pläne zu verfolgen. Anschließend müsste die Sonde noch die Reise an den Rand des Sonnensystems bestreiten.

In der Zwischenzeit werden die Wissenschaftler weiter an besseren Klimamodellen arbeiten und im Labor versuchen, die Chemie der Atmosphäre und des potenziellen Ozeans zu simulieren. Daneben werden Astronomen sicherlich das James-Webb-Weltraumteleskop nutzen, um einen erneuten Blick auf den Zwergplaneten zu werfen. Der Hubble-Nachfolger wird Pluto zwar nicht mit einer sehr hohen Auflösung abbilden können. Aber er wird in der Lage sein, längere Wellenlängen aufzuzeichnen – und damit wahrscheinlich wieder etwas Neues enthüllen. ◀

QUELLEN

Cruikshank, D.P. et al.: Prebiotic chemistry of Pluto. *Astrobiology* 19, 2019

Nimmo, F. et al.: Reorientation of Sputnik Planitia implies a subsurface ocean on Pluto. *Nature* 540, 2016

Stern, S.A. et al.: Pluto's far side. *Icarus*, 10.1016/j.icarus.2020.113805, 2020

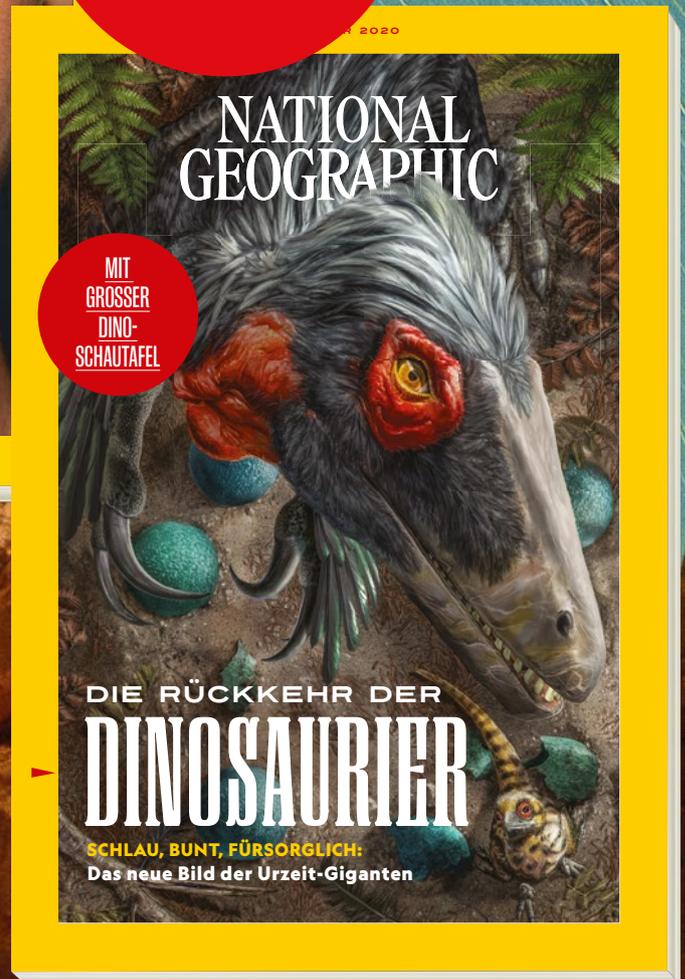
nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 583, S. 674–678, 2020

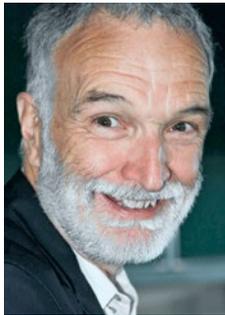
ES GIBT VIEL ZU ENTDECKEN!



IM HANDEL
ODER
VORTEILSABO
SICHERN



SCHLICHTING! WENN DER WIND DIE HARFE SPIELT



Von Luft umströmte Drähte erzeugen Wirbel, die sich hinter ihnen abwechselnd nach oben und unten hin ablösen. Aus dieser Schwingung werden unter den richtigen Umständen weithin hörbare Töne.

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/1773738

Du, einer luftgebornen Muse Geheimnisvolles Saitenspiel

Eduard Mörike (1804–1875)

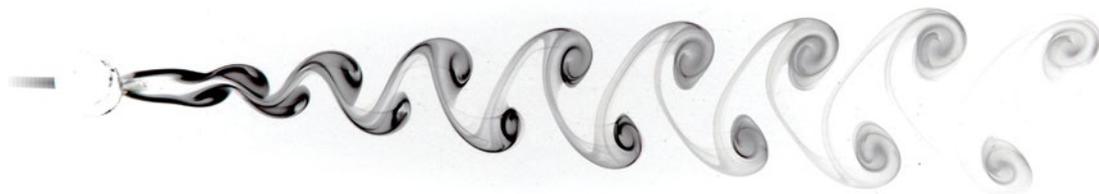
Heute sieht man sie immer seltener, aber bis vor wenigen Jahrzehnten haben oberirdische Telegraf- und Stromleitungen zahlreiche Haushalte mit Nachrichten und elektrischer Energie versorgt. Mit den typischen hölzernen Masten verschwindet auch ein eindrucksvolles akustisches Phänomen: Bei kräftigem Wind – oder wenn man sein Ohr an einen der Pfeiler hält – sind heulende, lang gezogene Töne zu hören, die mit der Windstärke auf- und abschwellen. Sie werden von den Drähten hervorgerufen, die darüber hinwegziehende Luft in Schwingung versetzen. Die Masten fungieren dabei als Resonanzkörper.

In ländlichen Gegenden führen manchmal noch solche Leitungen zu den Häusern, doch meist sind sie verstummt. Denn inzwischen bestehen sie statt aus relativ dünnen Drähten aus dicken, isolierten Kabeln, die dafür weniger geeignet sind. Allenfalls Weidezäune aus einzelnen gespannten, zylindrischen Drähten bieten bei starkem Wind eine Chance auf ähnliche Töne.

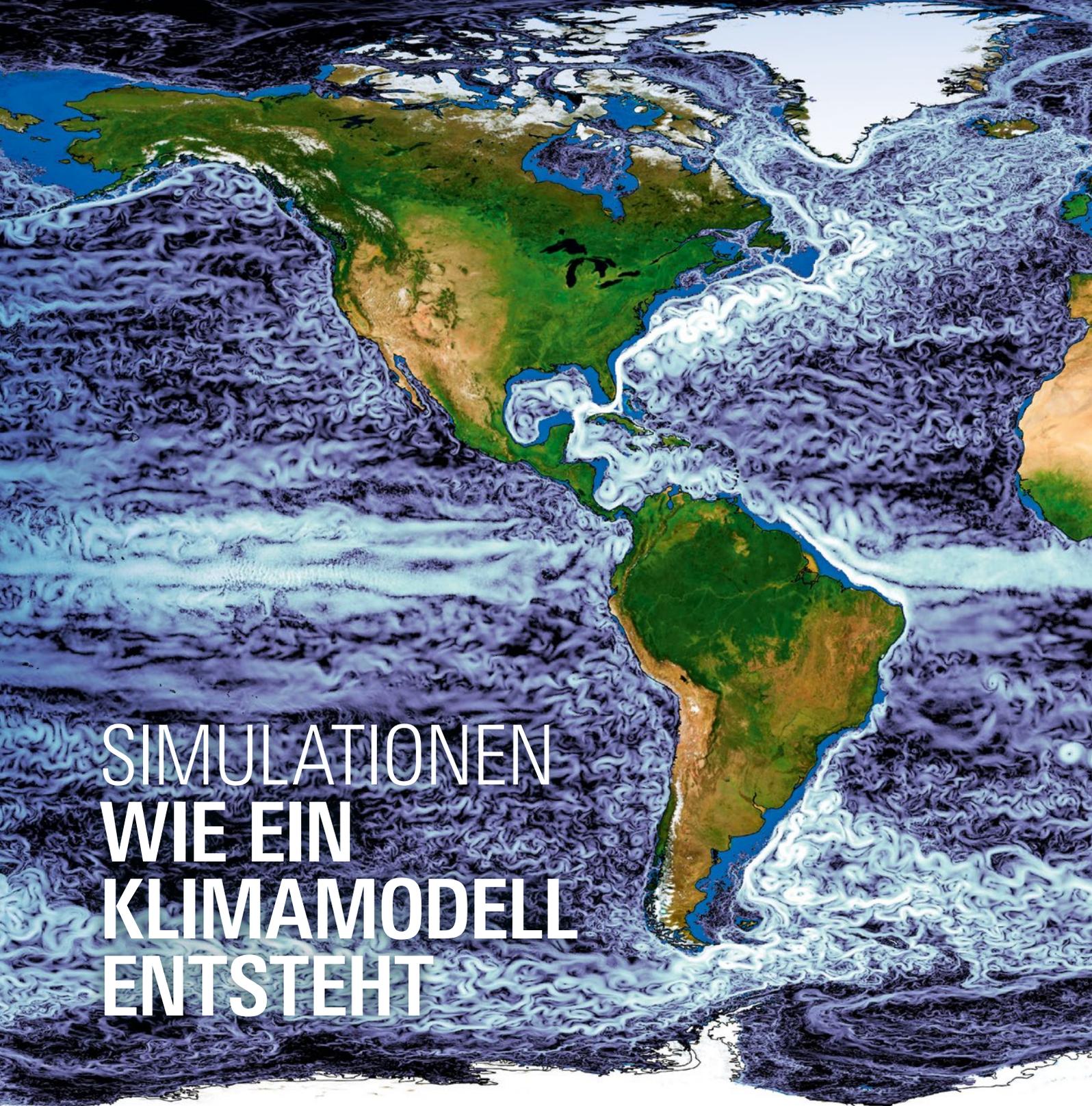
Bei einer kármánschen Wirbelstraße lösen sich abwechselnd entgegengesetzt rotierende Wirbel auf der Rückseite eines umströmten Zylinders ab.

Mit der Elektrifizierung hat das allerdings gar nichts zu tun; schon lange vorher haben die Menschen derartige vom Wind hervorgerufenen Klänge in der Natur wahrgenommen und versucht, sie mit Hilfe besonderer Vorrichtungen gewissermaßen einzufangen. Die Windharfen oder Äolsharfen (nach dem Windgott Aiolos) genannten Geräte waren bereits im Altertum bekannt. Das Wissen hat sich bis in die Neuzeit gehalten, wo der Universalgelehrte Athanasius Kircher (1602–1680) ein Exemplar baute. Erst während der Romantik im 19. Jahrhundert erlebte das Musikinstrument eine neue Blütezeit. Auch heute noch kann man Äolsharfen als Kunstwerke im öffentlichen Raum vorfinden oder sogar für den eigenen Garten kaufen.

Das Funktionsprinzip blieb lange ein Rätsel, obwohl die Beobachter durchaus den Wind ursächlich mit dem Klang in Verbindung brachten. Arbeiten von Vincent Strouhal (1850–1922) führten schließlich zu einer weitgehend korrekten Erklärung. Der tschechische Physiker stellte fest, dass ein von Luft umströmter zylindrischer Draht selbst dann Töne erzeugt, wenn er an der eigentlichen Schwingung gar nicht teilnimmt. Die jeweilige Tonhöhe beziehungsweise Frequenz erweist sich als unabhängig von Material, Länge und Spannung des Drahts. Sie ist lediglich proportional zur Windgeschwindigkeit und steht



JÜRGEN VÄGNER (DOMINIKS WIKIMEDIA ÜBER WIKIRILE;
KÁRMÁNSCHE WIRBELSTR. BROUČEK/SIBELIUS/PIB/CC BY-SA 4.0
KÄRMÁNSCHE WIRBELSTR. BROUČEK/SIBELIUS/PIB/CC BY-SA 4.0
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



SIMULATIONEN WIE EIN KLIMAMODELL ENTSTEHT

Vielfältige physikalische Vorgänge steuern das Klima auf der Erde und beeinflussen sich gegenseitig auf verschiedensten Skalen. Mathematische Methoden machen das komplexe Geschehen berechenbar. Wie zuverlässig sind darauf basierende Prognosen bereits – und wie können sie in Zukunft noch besser werden?



Computersimulationen liefern inzwischen detaillierte Bilder von Strömungen in der Atmosphäre oder – wie hier – in den Ozeanen. Dahinter stecken komplizierte mathematische Modelle und leistungsfähige (numerische) Algorithmen.



Armin Iske (links) ist seit 2005 Professor am Fachbereich Mathematik der Universität Hamburg. Er forscht an der numerischen Simulation fluiddynamischer Anwendungen. **Stephan Juricke** ist Klimamodellierer an der Jacobs University Bremen sowie dem Alfred-Wegener-Institut und untersucht Strömungen im Ozean und des Meeres. Beide Wissenschaftler arbeiten im Verbundprojekt mehrerer norddeutscher Institutionen »Energy Transfers in Atmosphere and Ocean«. Es beschäftigt sich unter anderem damit, wie Vorgänge zur lokalen Energieverteilung in verlässlichere Klimamodelle einfließen können.

» spektrum.de/artikel/1773717

SERIE **Klimawandel**

Teil 1: September 2020

Deutschland im Klimawandel

Diana Rechid, Andreas Bolte, Ralf Weisse, Rita Adrian, Benjamin M. Kraemer

Teil 2: Oktober 2020

Chronisten der Erdgeschichte

Tim Kalvelage

Teil 3: **November 2020**

Wie ein Klimamodell entsteht

Armin Iske und Stephan Juricke

► Zu den wichtigsten Werkzeugen in der Klimaforschung gehören mathematische Modelle und leistungsfähige Algorithmen für Computersimulationen. Mit diesen beschreiben die Wissenschaftler inzwischen seit Jahrzehnten, wie sich das Klima auf der Erde entwickelt – vereinfacht und dennoch möglichst genau. Sie nutzen die Berechnungen einerseits für Vorhersagen und andererseits wie künstliche Laboratorien. Damit untersuchen sie physikalische Phänomene und Zustände, die sich in der Realität kaum oder nur mit großen Risiken darstellen ließen. Was könnte beispielsweise geschehen, wenn sich große Meeres- oder Luftströmungen verändern, Wälder verschwinden oder wir Partikel wie Staub in die Atmosphäre einbringen?

Diese Art der Forschung erscheint vielen abstrakt. Doch ganz ähnliche Modelle sind fest in unserem Alltag verankert: die Wettervorhersagen. Auch diese wissenschaftlichen Prognosen basieren auf Simulationen. Für den Wetterbericht laufen täglich Berechnungen auf riesigen Supercomputern. Wetter- und Klimamodelle sind im Detail nicht dasselbe und erfüllen andere Aufgaben. Die mathematischen Grundbausteine haben allerdings eine vergleichbare Struktur, die Unterschiede liegen in den Feinheiten. Um die Möglichkeiten und Grenzen von Klimamodellen besser zu verstehen, hilft es deshalb, sich zunächst das Wetter genauer anzuschauen.

Mathematiker sprechen beim Wetter von einem hochgradig nichtlinearen System. Ein lineares System reagiert auf eine kleine Störung, indem es seine Eigenschaften im gleichen Verhältnis dazu verändert. Bei einem etwas größeren Einfluss fällt die Reaktion proportional stärker aus – etwa wenn man beim Laufen bei doppeltem Kraftaufwand die zweifache Geschwindigkeit erreichen würde. Jeder weiß, dass bereits dieses vereinfachte Beispiel nicht stimmt: Wenn man schneller läuft, kostet es unverhältnismäßig mehr Kraft, auf ein noch höheres Tempo zu kommen. Schon das Laufen ist nichtlinear. Beim Wetter ist es noch viel komplizierter. Zum Beispiel kann ein leichter örtlicher Temperaturanstieg in einem Augenblick mehr Wind hervorrufen. Zu einem anderen Zeitpunkt und unter

etwas geänderten atmosphärischen Bedingungen kann der gleiche Vorgang den Wind abflauen lassen. Die Reaktion verhält sich nicht mehr gleich bleibend zur Störung, und Vorhersagen fallen wesentlich schwerer.

Für nichtlineare Systeme sind mathematische Methoden und äußerst leistungsfähige Algorithmen nötig, die genau an das Problem angepasst sind. Ob die daraus resultierenden Computersimulationen überhaupt plausibel sind, prüfen Wissenschaftler kritisch in fachübergreifenden Kooperationen. Der Arbeitsschritt ist enorm wichtig und heißt Validierung. Dabei untersuchen die Experten, wie nah oder wie fern die Prognose von der Realität entfernt ist. Häufig müssen die Modellierer daraufhin ihre eingesetzten Algorithmen korrigieren. Reale Beobachtungen zum Beispiel mit Sensoren auf der Erde oder durch Satelliten liefern dafür wertvolle Informationen. Die Vorhersagen lassen sich an den Messdaten überprüfen und werden so ständig zuverlässiger.

Unmerkliche Unterschiede mit unvorhersehbaren Konsequenzen

Das Wetter ist nicht nur nichtlinear – es ist vielmehr ein chaotisches System! Man kann also schon nach relativ kurzer Zeit nicht mehr genau auf den Zustand zu Beginn zurückschließen. Kleine Störungen wie lokaler Regenfall können rapide anwachsen und sich schnell auf die Großwetterlage auswirken. Beim Klima verhält sich das genauso. Chaotische Systeme reagieren höchst sensibel auf Änderungen, solange man ihnen genug Zeit gibt. Das ist allgemein als Schmetterlingseffekt bekannt: Ob ein Tornado in Texas entsteht oder nicht, könnte an so einem kaum merklichen Unterschied in den Anfangsbedingungen wie dem Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien einige Tage zuvor liegen. Die Analogie stammt vom US-Mathematiker und Meteorologen Edward N. Lorenz (1917–2008) und verdeutlicht das Prinzip, nach dem die Auswirkungen winziger Störungen auf lange Sicht nicht mehr voraussagen sind (siehe Bild auf S. 58). Ein anderes Beispiel kommt aus der Sciencefiction, wo minimale Veränderungen bei Zeitreisen katastrophale Folgen haben – das Zertreten eines Baumsetzlings lässt einen ganzen Wald verschwinden. Die Konsequenz: Selbst mit den besten Modellen, Supercomputern und Messdaten ließe sich das stündliche Wetter in den meisten Fällen nur etwa zwei Wochen weit voraussagen. Tatsächlich können wir mit unseren momentanen Methoden derzeit im Schnitt etwa fünf bis sieben Tage recht verlässlich in die Zukunft schauen.

Wenn Wettervorhersagen schon nach einigen Tagen scheitern, welchen Sinn haben dann Klimamodelle, die viel größere Zeiträume überblicken sollen? Dort ist das Ziel jedoch nicht, das Wetter an einem bestimmten Tag und Ort in ferner Zukunft vorherzusagen. Vielmehr geht es um statistische Eigenschaften. Über mehrere Monate und Jahre soll in den Simulationen die gleiche Anzahl an regnerischen und sonnigen Tagen, Stürmen, Schneefällen und so weiter vorkommen wie in der Wirklichkeit. Das muss gerade auch dann der Fall sein, wenn sich das Klima durch äußere Einflüsse wie einen steigenden Gehalt von Kohlendioxid in der Atmosphäre oder wechselnde Sonneneinstrahlung

AUF EINEN BLICK ORDNUNG INS CHAOS

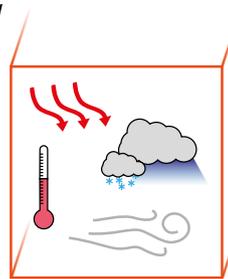
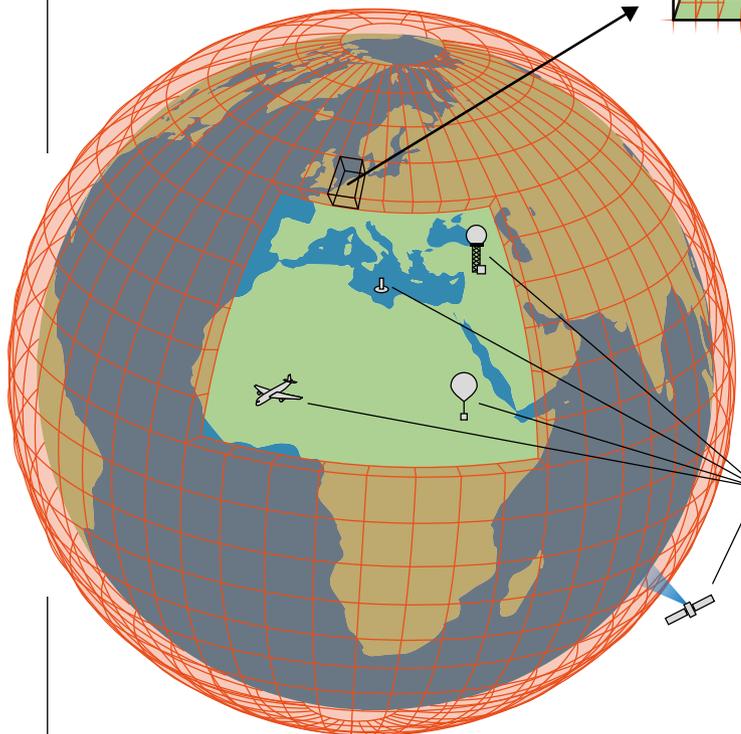
- 1** Das Wetter und das Klima sind hochgradig nichtlineare Systeme – kleine Änderungen wirken schnell und möglicherweise unvorhersehbar auf großen Skalen.
- 2** Dennoch errechnen Simulationen Eigenschaften des Klimas auf Jahrzehnte in die Zukunft. Das klappt nur mit ausgefeilten Modellen. Deren Zuverlässigkeit muss sich ständig an realen Beobachtungen messen lassen.
- 3** Effizientere Algorithmen bilden zusammen mit leistungsfähigen Supercomputern zunehmend viele physikalische Prozesse auf der Erde immer feiner ab.

Ein Gitter für die Erde

Wichtige physikalische Vorgänge spielen sich auf unterschiedlichsten Skalen ab. Sie alle bis ins kleinste Detail zu erfassen, würde allerdings jeden Supercomputer überfordern. Darum teilen Wetter- und Klimamodellierer den Globus auf, indem sie ihn mit einem Gitter überziehen und in diesem die diversen Prozesse mit Näherungen berücksichtigen. Es gibt heute zahlreiche Varianten, und Quader sind dabei nur die uns im Alltag geläufigste Art, die Welt aufzuteilen. Oft besteht das Volumen stattdessen etwa aus dreieckigen Grundflächen.

Klimamodelle unterteilen die Atmosphäre und die Ozeane in viele Abschnitte.

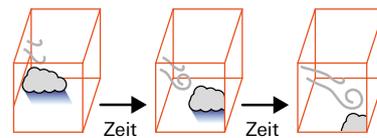
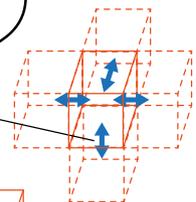
In dem Volumen liegen neben- und übereinander zahlreiche, mehrere Kilometer große Zellen. Je feiner das Gitter ist, desto besser kann ein Modell die physikalischen Vorgänge erfassen. Doch mit der Anzahl an Zellen steigt die nötige Rechenleistung enorm an.



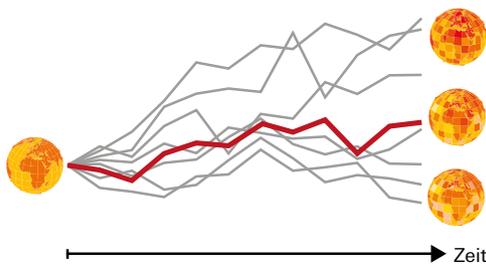
Das Klimamodell verarbeitet für jeden Quader Größen wie Temperatur, Druck oder Feuchtigkeit. Es erfasst möglichst alle wichtigen Phänomene auf und über der Erde in Form von Gleichungen und Parametern.

Messwerte von weltweit verteilten Stationen, Sonden und Satelliten dienen als Grundlage – und als Kontrolle.

Wechselwirkungen



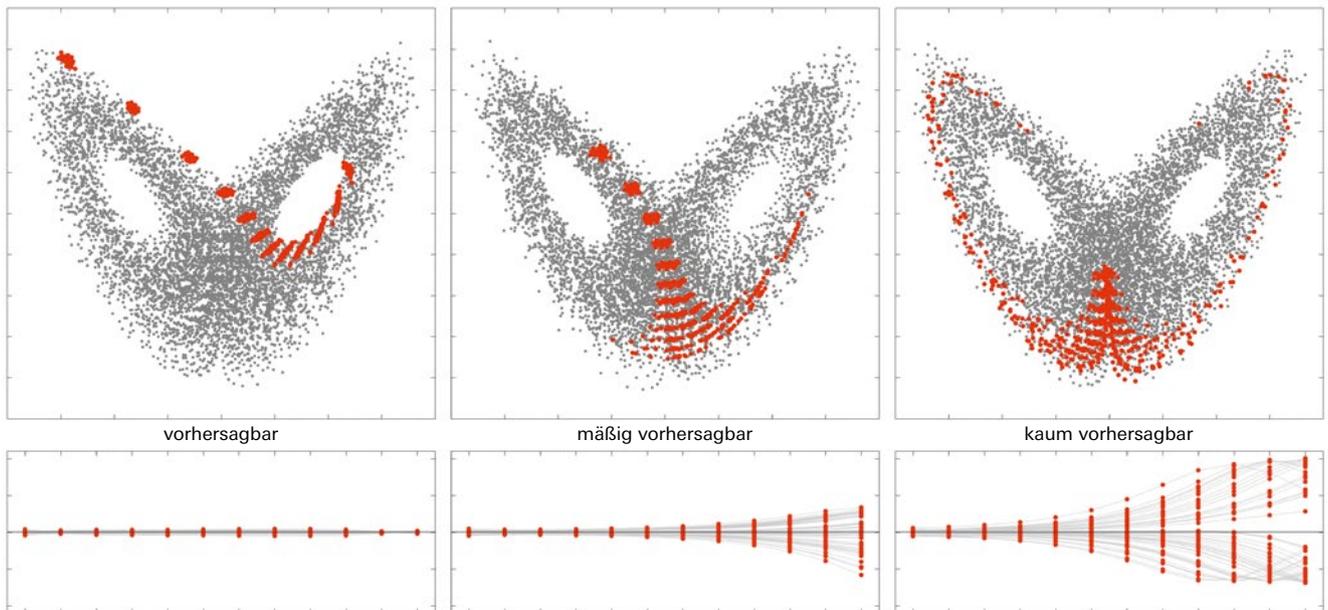
Jeder Zeitschritt der Simulation liefert die Änderungen der Größen in jedem Quader. Das hängt auch davon ab, was in den benachbarten geschieht.



Trotz nahezu identischer Startbedingungen entwickeln sich alle Simulation etwas anders – prinzipielle Ungenauigkeiten wirken sich mit der Zeit verschieden aus. In eine Prognose fließen darum etliche individuelle Durchläufe ein.



So entsteht eine mögliche Zukunft für den ganzen Globus.



MIT FRÖL. GER. VON ANEESH SUBRAMAN, UNIVERSITY OF COLORADO BOULDER

Abhängig von den Anfangsbedingungen erzeugen leichte Störungen oder Unsicherheiten sehr unterschiedliche Resultate. Der so genannte Lorenz-Attraktor (obere Reihe) ist ein vereinfachtes Modell für atmosphärisches Chaos und beschreibt die Menge der möglichen Zustände des Systems. Je nach Startregion kann die Entwicklung der Verlaufskurve (untere Reihe) ganz verschieden gut vorhersagbar sein. Der Pfad eines Hurrikans etwa könnte sich recht gut prognostizieren lassen (links) – oder im schlechtesten Fall ebenso in die eine wie die andere Richtung führen (rechts).

lung verändert. Dabei ist nicht mehr wichtig, ob die Realität und das Modell synchron laufen, also zum gleichen Zeitpunkt das gleiche Ereignis geschieht. Beim Klima interessiert uns nicht, ob es am 23. August 2050 regnet. Vielmehr wollen wir wissen, wie stark sich beispielsweise der Niederschlag im Zeitraum zwischen 2040 und 2060 verglichen mit 1990 bis 2010 ändern wird. Der Unterschied zwischen Wetter- und Klimavorhersagen liegt also gerade im Betrachten der Ereignisse als Statistiken. Die Fragestellung ist eine andere, aber die Phänomene und das physikalische System, das wir beschreiben wollen, sind die gleichen.

Die Simulationen selbst gehen zurück auf grundlegende Gesetze der Physik. Die Bewegungen und die Temperatur in unserer Atmosphäre oder den Ozeanen, die Luftfeuchtigkeit oder der Salzgehalt des Wassers, all das lässt sich mit partiellen Differenzialgleichungen beschreiben. Diese geben nicht die tatsächliche Temperatur oder Windgeschwindigkeit an, sondern vielmehr, wie sich die einzelnen Eigenschaften ändern – mit der Zeit oder auch in Bezug auf eine andere physikalische Größe.

Solche Zusammenhänge werden mit Ableitungen beschrieben: Die zeitliche Ableitung des Orts eines fahrenden Autos ergibt beispielsweise seine Fahrgeschwindigkeit, eine Strecke pro Zeit. Fährt das Auto schneller, wird sie größer. Zur Geschwindigkeit gibt es wiederum eine zeitliche Ableitung, nämlich die Beschleunigung. Das ist also die Rate, mit

der sich die Geschwindigkeit ändert. Solche Arten zeitlicher Ableitungen gibt es beim Klima für Windgeschwindigkeiten und für weitere wichtige Größen wie Luftfeuchtigkeit, ozeanischen Salzgehalt, Temperatur und atmosphärischen Druck. Die Gleichungen heißen partiell, weil darin neben den zeitlichen auch ortsabhängige Ableitungen vorkommen. Die Steigung einer Straße ist die Ortsableitung ihrer lokalen Höhe – pro zurückgelegtem Meter gelangt man der Steigung entsprechend einen gewissen Wert aufwärts.

In vielen mathematischen Modellen der Physik tauchen partielle Differenzialgleichungen auf. Deren Lösungen stellen näherungsweise die tatsächlichen Zustände zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort dar. In die Modellierung fließen bekannte Gesetze der Physik ein, etwa das wichtige Prinzip der Masseerhaltung. Demnach geht Masse nicht einfach so verloren. Ändert sie sich an einem Ort, muss etwas von außen hinzugekommen oder weggenommen worden sein. So füllt sich eine Badewanne nicht von selbst. Erst wenn der Hahn aufgedreht ist, fließt Wasser hinein. Zieht man den Stöpsel, läuft es ab. Der Pegel steigt insgesamt, wenn weniger aus der Wanne heraus- als hineingelangt. Nach dem Gesetz der Masseerhaltung ändert sich der Wasserpegel also nur dann, wenn es Quellen oder Senken gibt. Derartige fundamentale Regeln beschreiben ebenso die Veränderungen in der Atmosphäre und den Ozeanen. Sie werden mit sehr komplizierten Systemen von partiellen Differenzialgleichungen modelliert.

Im Alltag sind wir nicht so sehr daran interessiert, wie sich das Wetter langsam wandelt, sondern wie es morgen tatsächlich aussieht. Dazu müssen die partiellen Differenzialgleichungen des zu Grunde liegenden Modells gelöst werden. Das bedeutet: Aus Gleichungssystemen mit zeitlichen und örtlichen Änderungen einer physikalischen Größe wird etwas berechnet, mit dem wir den Wert der Größe an einem beliebigen Ort und zu einem beliebigen Zeitpunkt näherungsweise ermitteln können. Die Lösung von partiellen Differenzialgleichungen birgt sehr häufig große mathe-

matische Herausforderungen. Eine grundlegende Lösungsmethode ist die Integration. Dabei werden etwa zeitliche Änderungen über beliebig kleine Zeitabschnitte aufsummiert. Kennt man die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs auf einem Streckenabschnitt, so kann man bereits beim Start den genauen Ort vorhersagen, den es nach einer bestimmten Zeit erreichen wird.

Ähnlich kann man sich das bei den atmosphärischen und ozeanischen Größen vorstellen. Dort beruhen die Differenzialgleichungen der Modelle zwar auf relativ einfach verständlichen physikalischen Grundgesetzen, allerdings sind die Gleichungen sehr kompliziert. Eine Lösung mit Papier und Bleistift ist unmöglich, vielmehr wird sie mit mathematischen Algorithmen auf leistungsfähigen Computern numerisch berechnet. Das liefert etwa für einen Zeitpunkt und einen Ort eine Näherung an die Temperatur, die Windgeschwindigkeit und andere wichtige Größen.

Eine Grundtechnik zu so einer numerischen Lösung heißt Diskretisierung. Die Differenzialgleichungen der jeweiligen Modelle beschreiben die Änderungen der physikalischen Zustandsgrößen kontinuierlich, zu jeder Zeit an jedem Ort. Die Diskretisierung macht daraus kleine Zeitintervalle beziehungsweise räumliche Teilstücke. Die Lösungen der Differenzialgleichungen werden nun an bestimmten Zeit- und Ortspunkten der Diskretisierung näherungsweise dargestellt. Beispielsweise ließe sich die zeitliche Änderung einer Strömung stundenweise beschreiben. Dann enthält die Diskretisierung bezüglich der Zeit pro Tag 24 Teile. Gleichermassen lässt sich die ganze Erde in einzelne Zellen gliedern, die jeweils viele Kilometer Durchmesser haben. Das spannt ein Netz – wir sagen auch Gitter – über den gesamten Globus (siehe »Ein Gitter für die Erde«, S. 57). An dessen Schnittpunkten, den Knoten, werden die Gleichungen numerisch gelöst. Dabei ist die Feinheit der Unterteilung wichtig: Sehr kleine Zeitschritte und eng gespannte Gitter der örtlichen Punkte benötigen unermesslich viel Rechenleistung, liefern aber auch genauere Ergebnisse.

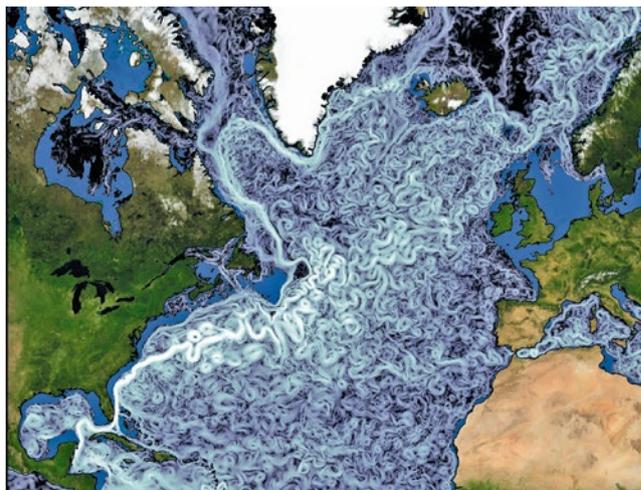
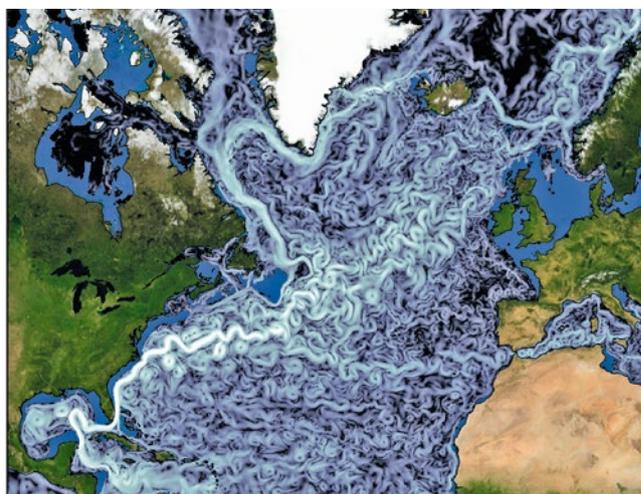
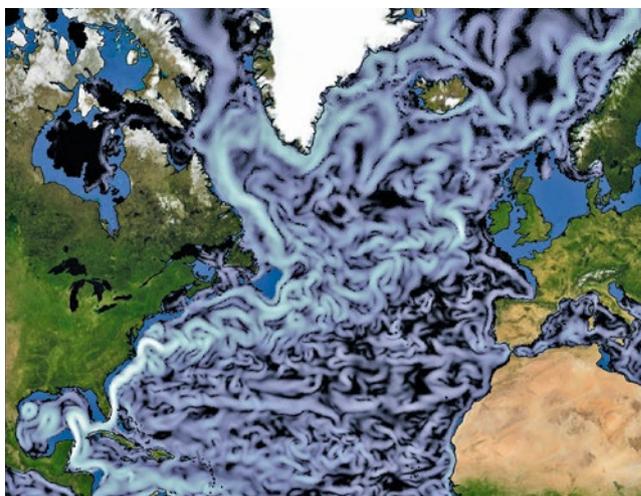
Die Kunst der richtigen Auflösung

Die numerischen Algorithmen werden auf Supercomputern ausgeführt – auf dem diskreten Gitter, so als säße an jedem Knoten ein Mensch, der für seinen speziellen Ortspunkt die Berechnungen übernimmt. Dafür reicht es jedoch nicht, zu wissen, was an dem Knoten selbst gerade passiert. Zusätzlich muss klar sein, was kurz zuvor dort geschehen ist und was an den Orten in der Umgebung vorgeht. Schließlich beinhalten partielle Differenzialgleichungen sowohl zeitliche als auch örtliche Ableitungen, also Änderungen in Zeit und Ort. Ein Anstieg der Temperatur lässt sich nur berechnen, wenn der vorherige Wert bekannt ist. Zudem muss man das Geschehen an benachbarten Knoten kennen, um vorhersehen zu können, ob demnächst vielleicht ein Wolkenfeld heranzieht. Das tun wir ganz automatisch beim Blick auf Radaraufnahmen in der Wetter-App auf dem Smartphone: Wer daran interessiert ist, ob er demnächst nass wird oder nicht, extrapoliert, wohin die Wolken wohl getrieben werden, basierend auf dem, was zuvor und an anderer Stelle geschehen ist. Jeder von uns macht das ebenso bei fahrenden Autos vor dem Überqueren der

Straße. In solchen Fällen integrieren wir im Kopf mit der abgeschätzten Geschwindigkeit über die Zeit.

Die numerischen Verfahren der Diskretisierung brechen nun die Ableitungen in den Differenzialgleichungen herunter – auf eben solche zeitlichen und örtlichen Nachbarschaftsverhältnisse auf dem diskreten Gitter und in diskreter Zeit. Mathematiker sagen, sie approximieren die Ableitungen, das heißt, sie nähern sie an. Je kleiner die Schritte

Modelle mit (von oben nach unten) 24, 8 und 4 Kilometer Auflösung erfassen kleinräumige Vorgänge und somit auch großskalige Strömungen immer besser.



werden und je feiner das Gitter ist, desto exakter löst der Computer die Gleichungen. Das ist in gewisser Hinsicht wie bei einem digitalen Foto, das immer schärfer wird, je mehr Pixel zur Verfügung stehen. Bei einer grob aufgelösten Aufnahme bilden sie den Mittelwert aus den Farbdetails, die eigentlich innerhalb des Bildpunkts liegen. Die feinen Strukturen gehen dann verloren, das Gesamtbild ist dennoch zu erkennen.

In der Klimamodellierung ist es leider noch etwas komplizierter. Während einem Foto unabhängig von der Auflösung ein und dasselbe Motiv zu Grunde liegt, wandeln sich bei Klimamodellen ständig die Details innerhalb einer Zelle des Gitters. Schließlich entwickelt sich das Wetter unentwegt fort. Die Einzelheiten, die zu klein sind, um gesehen zu werden, ändern sich aber nicht einfach nur mit der Zeit. Sie beeinflussen außerdem die größeren Prozesse. Wie bei der Metapher vom Schmetterlingseffekt können sich selbst unscheinbare Phänomene schließlich auf große oder weit entfernte Vorkommnisse auswirken. Das Aufteilen der Welt in ein diskretes Gitter jedoch ignoriert all die kleinen Prozesse, die gewissermaßen durch das Netz fallen.

Ein großer Teil der Arbeit in unserem Forschungsgebiet besteht darin, die Auswirkungen der winzigen Prozesse nachträglich in die Gleichungen einzubauen. Dabei bedienen sich Klimamodellierer verschiedener Methoden. Sie nutzen theoretisches Wissen aus der Physik und Mathematik und leiten daraus zum Beispiel die weiter reichenden Konsequenzen von kleineren Strömungen im Ozean oder in

der Atmosphäre her. Messungen in der realen Welt helfen ihnen, die Prozesse und ihre Wechselwirkungen besser zu verstehen. Dann stellen sie neue Gleichungen auf, die den Effekt der kleinen Vorgänge imitieren.

Das Ergebnis sind »Parametrisierungen« – das heißt mathematische Zusammenhänge, die auf einstellbaren Parametern beruhen. Diese sind so etwas wie Regulierschrauben für den entsprechenden Prozess und bringen das Modell näher an die Beobachtungen heran. Je besser die zusätzlichen Gleichungen sind und je geschickter deren Parameter justiert sind, desto zuverlässiger bezieht das Modell die kleinen Prozesse mit ein, die sonst durch das Gitter gefallen wären. Und da unser Klimasystem so eng verwoben ist und sich Vorgänge auf allen Skalen aufeinander auswirken, ist es wichtig, selbst jene näherungsweise zu beschreiben, die eigentlich nicht mehr sichtbar sind.

Eine Frage der Balance aus Genauigkeit und Aufwand

Parametrisierungen sind allerdings immer eine mögliche Fehlerquelle. Wir haben also einerseits die Diskretisierung, die sich mit numerischen Verfahren der Wirklichkeit nur annähert, und andererseits die Parametrisierungen, die ebenso die realen Prozesse lediglich approximieren. Am Ende kommt es auf eine Balance an. Eine höhere Auflösung, also ein feineres Gitter für das Modell, verkleinert sowohl numerische Fehler als auch solche der Parametrisierung. Das bildet mehr Prozesse tatsächlich ab und teilt Zeit

Ein aufwändiges Unterfangen

Klima- und Wettersimulationen laufen auf Großrechnern. Um sie durchführen zu können, müssen Forschungsinstitute meist Zeit auf den Supercomputern beantragen. Diese bestehen aus Zehntausenden oder Hunderttausenden von miteinander verbundenen Prozessorkernen. Sie führen die entsprechenden Berechnungen parallel durch.

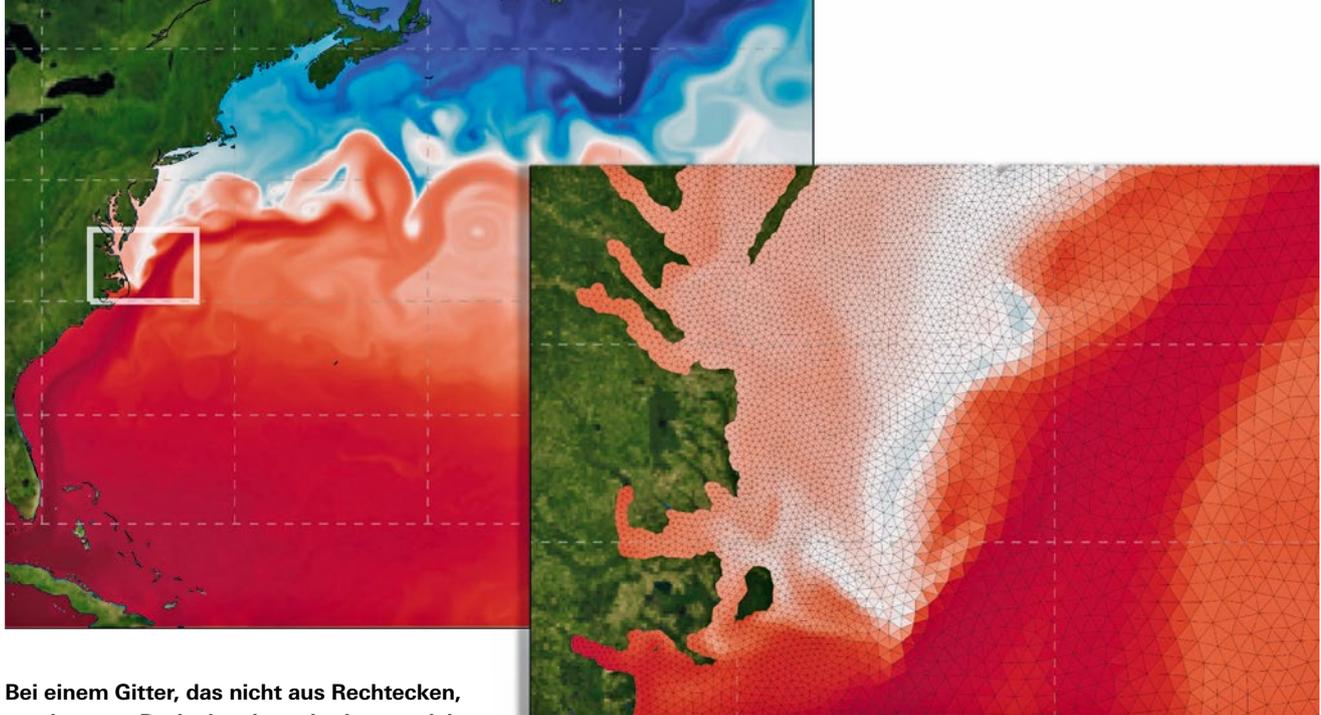
Die Anzahl der Kerne und der benötigte Zeitraum, um zum Beispiel ein Jahr zu simulieren, hängen von Faktoren wie der Komplexität, der Anzahl an Klimakomponenten und der Auflösung ab. Klimasimulationen mittlerer Auflösung zwischen 25 und 100 Kilometern für Ozean und Atmosphäre benötigen einige tausend Prozessorkerne und schaffen zwischen einem und zehn Simulationsjahre

pro realem Tag. Für die oftmals gewünschten virtuellen Jahrhunderte vergehen so in Wirklichkeit zum Teil Wochen – vorausgesetzt, der Supercomputer wird in der Zeit nicht außerdem intensiv von anderen Forschergruppen genutzt.

Für künftige Simulationen mit einem etwa ein Kilometer großen Gitter, das Wolken explizit auflöst, wären 15 Milliarden Gitterpunkte allein für die Atmosphäre nötig. Hinzu kämen andere grundlegende Komponenten wie der Ozean. Dafür bräuchten die Supercomputer eine Leistung im Bereich von Exaflops. Flops (englisch für floating point operations per second) bezeichnen eine Operation wie Multiplikation oder Addition zweier Dezimalzahlen pro Sekunde. Zum Vergleich: Optimierte Grafikkarten in kommerziellen Com-

putern erreichen heute eine Leistung in der Größenordnung von zehn Teraflops, das sind zehn Millionen Millionen solcher Operationen pro Sekunde. Exaflops wiederum sind Millionen von Teraflops. Das übersteigt momentan die Kapazitäten selbst der schnellsten und größten Supercomputer der Welt.

Neu konzipierte Prozessorkerne und deren stetig anwachsende Parallelisierung sollten bald dorthin führen. Allerdings sind Supercomputer in der Anschaffung und im Unterhalt enorm kostspielig – allein die Stromrechnung kann sich auf Millionen Euro im Jahr belaufen, zudem ist die Kühlung zunehmend aufwändig. Nicht zuletzt muss die Unmenge an gelieferten Daten noch gespeichert, verwaltet und ausgewertet werden.



Bei einem Gitter, das nicht aus Rechtecken, sondern aus Dreiecken besteht, lassen sich die Flächen flexibler aneinanderreihen und in ihrer Größe verändern. Bei dieser Ozeansimulation wird die Auflösung dort besser, wo sich interessantere und kleinteiligere Phänomene abspielen, beispielsweise an den Küsten. Die Farbe codiert die Temperatur an der Wasseroberfläche.

und Raum in genauere Intervalle auf. Aber das ist kostspielig. Die Berechnungen benötigen mehr Zeit und immer größere und stärkere Computer (siehe »Ein aufwändiges Unterfangen«, links).

Darum wägen alle Beteiligten zwischen Genauigkeit und Aufwand ab. Derzeit nutzen Klimamodelle eine örtliche Auflösung von einigen Dutzend Kilometern. Da sie über mehrere Jahrzehnte in die Zukunft schauen sollen, wären feinere Gitter hier derzeit oftmals zu teuer. Wettermodelle hingegen, deren Prognosen nur wenige Tage weit reichen müssen, rechnen inzwischen auf Gittern, deren Knoten weniger als zehn Kilometer voneinander entfernt sind.

Außerdem werden je nach Blickwinkel andere Teile des Klimas interessant. Die Forschenden fragen sich: Spielt eine gewisse Komponente – der Ozean, die Biosphäre oder die großen polaren Eisschilde – eine Rolle für den Zeitraum, den wir betrachten wollen? Innerhalb von ein paar Tagen ändert sich kaum etwas an der Bewaldung oder den Gletschern; nach ein paar Monaten oder Jahren sieht das durchaus anders aus. Bei langfristigen Klimavorhersagen müssen Vorgänge mit in Betracht gezogen werden, die bei Wetterprognosen kaum von Bedeutung sind. Dazu gehört auch der von Menschen verursachte Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre.

Aus der Sicht der angewandten Mathematik spielt die Weiterentwicklung der numerischen Algorithmen, mit denen die Modellgleichungen gelöst werden, eine zentrale Rolle. Bei der Bewertung steht vor allem die Leistungsfähigkeit der Algorithmen sehr kritisch auf dem Prüfstand. Sie sollen stabiler, effizienter und zuverlässiger werden.

Stabile Algorithmen machen die Berechnungen robuster, das heißt weniger empfindlich gegenüber Störungen durch

ungenau oder unsichere Daten, etwa durch Messfehler. Effiziente Algorithmen reduzieren die erforderliche Rechenzeit, während sich die Zuverlässigkeit daran bemisst, wie genau die Prognosen ausfallen.

Genauere Vorhersagen erfordern jedoch feinere Diskretisierungen, was wiederum die Rechenzeiten erhöht. Daher konkurrieren Effizienz und Genauigkeit – effizientere Algorithmen sollten eher weniger Gitterpunkte verwenden, genauere tendenziell mehr.

Um in diesem Dilemma zu vermitteln, verwenden problemangepasste Algorithmen unregelmäßig verteilte Gitterpunkte. Diese konzentrieren sich um Regionen, in denen höhere Auflösungen nötig sind, wie entlang von Küsten. Zugleich werden großflächige Bereiche, die für die Prognosen gegebenenfalls weniger interessant sind, gröber aufgelöst (siehe Bild oben). Solche Algorithmen heißen adaptiv; leistungsfähige Versionen von ihnen zu konstruieren, ist oft eine schwierige Aufgabe.

Angesichts der rapide steigenden Komplexität in den numerischen Simulationen werden – neben immer größeren und teureren Rechenmaschinen – intelligente und lernbasierte Algorithmen zunehmend wichtig. Aktuelle Entwicklungen des maschinellen Lernens steigern bereits heute die Leistung bei verschiedensten Anwendungen enorm. In Zukunft wird die mathematische Datenanalyse eine entscheidende Rolle spielen, wenn es um bedeutsame Fragen der Plausibilität, der Kausalität und der Zuverlässigkeit von Vorhersagen geht – auch für bessere Klimaprognosen. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



SEPPFRIEDHUBER / GETTY IMAGES / ISTOCK

INTERVIEW

»WIR MÜSSEN DEN BIOKUNSTSTOFFEN EINE CHANCE GEBEN«

Kompostierbare Mülltüten und Lebensmittelverpackungen aus Bio-PE haben chemisch nichts gemeinsam. Trotzdem zählen beide zu »Biokunststoffen«. Im Gespräch mit »Spektrum« diskutieren die Polymerforscher Frederik Wurm und Hans-Josef Endres über den Sinn und Unsinn bioabbaubaren und biobasierten Plastiks.

» spektrum.de/artikel/1757460

Wie gefällt Ihnen denn der Begriff »Biokunststoff«?

Hans-Josef Endres: Der Begriff an sich ist nicht schlecht, man sollte ihn allerdings nicht allein verwenden. Wichtig sind dabei zwei Adjektive: »bioabbaubar« und »biobasiert«. Das eine ist nicht gleichbedeutend mit dem anderen.

Biobasiertes Polyethylen (PE) ist chemisch gesehen einfach Polyethylen, mit exakt identischer Struktur und denselben Eigenschaften. Das bedeutet natürlich, dass ein biobasiertes PE nicht bioabbaubar ist. Für solche Kunststoffe gibt es noch viele ältere prominente Beispiele: Linoleum etwa oder Reifen, die aus natürlichem Latex hergestellt sind. Eine Reihe bekannter Werkstoffe wurde bereits entwickelt, bevor Erdöl verfügbar war. Sie waren biobasiert, doch nicht bioabbaubar.

Genauso können Sie aus petrochemischen Rohstoffen bioabbaubare Molekülstrukturen bauen. Die dritte Gruppe sind Materialien, die beide Eigenschaften besitzen, etwa Kunststoffe auf Stärke- oder Milchsäurebasis.

Woher stammen die nachwachsenden Rohstoffe für das Plastik?

Endres: Dazu lässt sich eine Reihe von Rohstoffen einsetzen. Man kann sie landwirtschaftlich erzeugen, wie Stärke und Zucker oder Pflanzenöle, die man etwa für Polyamide oder Polyurethane benötigt.

Man kann aber auch den Umweg über zellulosehaltige Pflanzen gehen, um die Diskussion um Tank oder Teller zu vermeiden. Dann lässt sich jedoch auf der gleichen Fläche meist viel weniger Ausgangsstoff für ein Polymer gewinnen. Wenn wir aber Flächeneffizienz verlieren, nur damit wir andere Rohstoffe anbauen als solche, die potenziell als

Prof. Dr. Frederik Wurm

entwickelt mit seiner Forschungsgruppe »Nachhaltige Polymerchemie« an der Universität Twente (Niederlande) biologisch abbaubare und molekular einstellbare Polymere. Davor arbeitete er am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz an bioabbaubaren Polyestern auf Phosphorsäurebasis. Der Chemiker hat unter anderem neue bioinspirierte Materialien entwickelt, beispielsweise für moderne Therapeutika in der Medizin.



Nahrungsmittel geeignet sind, dann ist es fraglich, ob das der richtige Weg ist. Auf der anderen Seite kommen Stroh oder andere Abfallstoffe ebenfalls in Frage.

Blieben wir noch kurz beim Thema Flächennutzung. Laut einem aktuellen Bericht des Instituts für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe IfBB in Hannover ließ sich alles biobasierte Plastik 2018 auf gut 500000 Hektar Land herstellen, für 2023 prognostiziert das Institut etwas mehr als 900000 Hektar. Es macht bislang allerdings bloß einen verschwindend geringen Teil der Kunststoffe aus. Wird die Landnutzung zum Problem, wenn sich die Größenordnungen drastisch verändern?

Endres: Wenn Sie eine Faustregel nehmen – aber das ist wirklich nur ein sehr grober Mittelwert –, dann erhalten Sie pro Hektar Land ungefähr zwei Tonnen Bioplastik. Letzten Endes decken die in den letzten 30 Jahren neu entwickelten Biokunststoffe, so genannte New-Economy-Kunststoffe, derzeit etwa ein Prozent des Markts ab. Rechnet man altbekannte biobasierte Materialien wie Viskose, Linoleum oder Kautschuk mit ein, kommt man auf fast zehn Prozent Marktanteil. Über die Landnutzung für solche Old-Economy-Kunststoffe sprechen wir gar nicht mehr.

Prof. Dr. Hans-Josef Endres

leitet das Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik an der Leibniz Universität Hannover. Zuvor war der Ingenieur acht Jahre lang Leiter des Instituts für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe IfBB an der Hochschule Hannover, das er selbst mit gegründet hat. Endres' Forschungsschwerpunkte sind Biopolymere, faserverstärkte Verbundwerkstoffe sowie Kunststofftechnik.

CHRISTIAN WURM



SERIE

Kunststoffe heute und morgen

Teil 1: September 2020

Dem Mikroplastik auf der Spur

Carolin Völker und Johanna Kramm

Teil 2: Oktober 2020

Zurück in den Kreislauf

Tamara Worzewski

Teil 3: November 2020

»Wir müssen den Biokunststoffen eine Chance geben«

Interview mit Hans-Josef Endres und Frederik Wurm

Würde man nun die gesamte Plastikproduktion weltweit biobasiert darstellen, dann benötigte man dazu rund fünf Prozent der insgesamt zur Verfügung stehenden Ackerfläche. Und jetzt müssen wir die Frage diskutieren, ob der menschliche Wohlstand – ob all das, was wir mit Kunststoffen verbinden – fünf Prozent der Ackerfläche wert ist.

Dabei gilt es aber noch mehr zu berücksichtigen: Zum einen können wir die Materialien mehrfach nutzen, also zunächst recyceln und erst am Ende verbrennen; zum anderen verwenden wir momentan sehr viel Ackerfläche für Biogas und Bioethanol, die wir als Energieträger direkt verbrennen. Es ist ein komplexes System, das wir von allen Seiten betrachten müssen.

Der andere Aspekt ist die biologische Abbaubarkeit von Kunststoffen. Herr Wurm, warum tun sich Mikroorganismen so schwer mit unseren gängigsten Plastiksorten?

Frederik Wurm: Das liegt an deren chemischer Struktur. Oft spaltet Wasser die Polymere, also Kunststoffe, im ersten Schritt in kleinere Fragmente. Anschließend bauen Mikroorganismen diese ab. Oder die Mikroben besitzen spezielle Enzyme, die direkt die Polymerketten »anknabbern«. Dafür brauchen sie allerdings Erkennungsstellen: Das Molekül muss gewisse Atome und Atombindungen enthalten, damit Enzyme oder Wasser es zersetzen können.

Wie sieht eine typische Erkennungsstelle aus?

Wurm: Eine ganz gängige Sollbruchstelle sind Ester. Natürlich sind nicht alle Polyester bioabbaubar, doch gerade aliphatische Ester wie etwa Polylactid (*PLA, Anm. d. Red.*), das keine aromatischen Einheiten enthält, lassen sich von Enzymen gut abbauen.

Sie entwerfen selbst bioabbaubare Polymere.

Wie gehen Sie dabei vor?

Wurm: In meiner Forschungsgruppe stellen wir zunächst kleine Moleküle her – aus biobasierten Rohstoffen, aus erdölbasierten oder aus anorganischen. Anschließend setzen wir sie zu großen Polymeren zusammen, und durch die molekulare Struktur können wir ihnen vorgeben, wie schnell sie kaputtgehen. Man muss dazu sagen, dass wir keine fertigen Produkte designen, sondern Grundlagenfor-

schung betreiben. Wir zeigen also, was mit Chemie möglich ist. Unser »Lieblingsspielzeug« sind phosphorsäurebasierte Polymere. Auch DNA enthält Phosphateinheiten – unser Erbgut ist eigentlich ein Polyester, und zwar ein sehr komplexer Polyphosphorsäureester. Durch die Chemie an der Phosphorsäure können wir bewirken, dass sich Polymere direkt zerlegen, wenn man sie in Wasser gibt. Wir können einstellen, ob das einige Stunden, Tage, Monate oder Jahre dauert. Das ist sehr einzigartig.

Zwischen den Phosphorsäure-Einheiten liegen lange Ketten, im Grunde genau dieselben wie etwa in Polyethylen. Was geschieht mit ihnen?

Wurm: Es kommt ganz darauf an, wie lang die Ketten sind. Bis zu einer gewissen Größe können Mikroorganismen sie wieder zersetzen. Dabei handelt es sich um kleine Bruchstücke, ähnlich wie in Seifen. Die meisten Seifen sind biologisch abbaubar, was etwa in der Kläranlage geschieht. Bei den Polymeren ist es im Endeffekt das Gleiche.

Löst bioabbaubares Plastik unser Müllproblem?

Wurm: Ich denke nicht, dass wir alle Kunststoffe durch bioabbaubare ersetzen sollten. Das Thema ist viel komplexer. Bioabbaubare Polymere oder Materialien brauchen wir dort, wo die Abbaubarkeit eine Funktion besitzt. Die berühmten Biomülltüten beispielsweise landen in der städtischen Kompostieranlage – daher wäre es gut, wenn sie sich tatsächlich biologisch zersetzen würden. Auch hier kennen wir die Medienberichte, dass sie sich doch nicht so schnell in den Anlagen abbauen, wie sie sollten, und daher wieder aussortiert werden. Vom Prinzip her ist der Ansatz jedoch gut. Ähnlich verhält es sich mit Mulchfolien in der Landwirtschaft: Wenn das Plastik auf dem Acker landet, ist Abbaubarkeit eine notwendige Funktion. Währenddessen gibt es ebenso Tassen oder Lampen aus Polylactid. Hierin sehe ich wenig Sinn – warum muss eine Lampe biologisch abbaubar sein? Sie hält normalerweise Jahre bis Jahrzehnte.

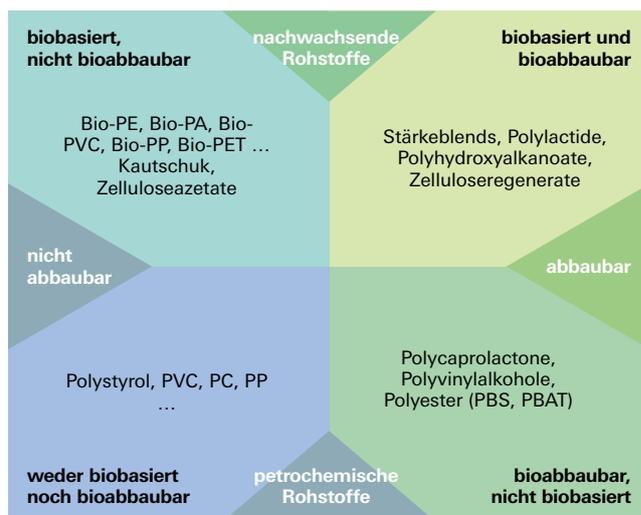
Kritiker merken an, neuartige, bioabbaubare Kunststoffe stellen ein Problem beim Recycling dar.

Wurm: Bleiben wir bei unserem Paradebeispiel PLA: Wenn der Stoff in den gelben Sack gelangt, habe ich ein Problem. Denn dort wird er nicht biologisch abgebaut, sondern eher als Verunreinigung im Recyclingprozess gesehen.

Endres: Die Recyclfähigkeit von Biokunststoffen – egal, ob biobasiert oder bioabbaubar – ist kein technisches Problem, sondern ausschließlich eine Frage der Menge. Für den Abfallsortierer ergibt es keinen Sinn, PLA von den anderen Materialien zu trennen, weil davon zu wenig vorhanden ist. Er kann das Polymer zwar über Infrarot-Spektroskopie identifizieren – die Technologie, mit der man in der Entsorgungsanlage verschiedene Kunststoffe erkennt und separiert. Doch es ist nicht sinnvoll, einen Scanner auf PLA zu programmieren, wenn man dadurch, sagen wir, am Tag fünf Jogurtbecher aussiebt. Das Ganze rechnet sich erst ab einigen zigttausend Tonnen im Jahr.

Wird es sich überhaupt einmal lohnen, ein getrenntes Recycling für neuartige Biokunststoffe aufzubauen?

Die Herkunft allein – ob aus nachwachsenden oder petrochemischen Rohstoffen – lässt noch nicht darauf schließen, ob Kunststoffe abbaubar sind.



Endres: Das Recycling von PET hat sich genauso mit der Menge entwickelt. Man muss der Sache Zeit geben. Die Natur bringt keine organischen Substanzen hervor, die sie nicht selbst verarbeiten kann. Erst wir Menschen haben solche Strukturen erzeugt. Daher müssen wir jetzt für die nicht beständigen Kunststoffe technische Lösungen zum Recycling schaffen oder der Natur abbaubare Kunststoffe anbieten.

Andererseits haben Forscher 2016 Bakterien entdeckt, die PET verdauen. Wäre es also sinnvoll, gezielt Kunststoff abbauende Organismen zu suchen oder maßzuschneidern?

Wurm: Man findet immer wieder Enzyme, die irgendwelche Materialien zersetzen können. Dabei stellt sich wieder die Frage nach der großtechnischen Umsetzung. Gerade die PET oder PE verzehrenden Enzyme sind hier schwierig.

Außerdem entstehen beim mikrobiellen Abbau von PE dieselben Endprodukte wie beim Kompostieren oder beim Verbrennen: CO₂ und Wasser. Wenn nicht auf dem Weg dorthin Biomasse gebildet wird, damit die Mikroorganismen wachsen, sehe ich darin keinen Vorteil.

Endres: Warum sollten wir ausgerechnet Polyethylen abbauen? Ein biobasiertes PE können und sollten wir recyceln. Und wenn wir es nicht mehr recyceln können, dann sollten wir es bitte verbrennen! Bei diesem Kreislauf wird am Schluss die gleiche Menge an CO₂ frei, wie in der Biomasse gebunden wurde. Dann haben wir trotzdem noch einen Nutzen. Ich stimme Herrn Wurm zu: Bioabbaubare Stoffe brauchen wir nur dort, wo die Abbaubarkeit eine Funktion bringt.

Abgesehen davon können Sie die Enzyme nicht einsperren. PE findet sich in den Rohren in der Erde, im Hausbau, in Isolationen, es ist überall – mir wird da angst und bange. Ihre Beständigkeit ist genau das, was die Kunststoffe auszeichnet. Natürlich ist ihre Persistenz ein Problem, und zwar ein gesellschaftliches, weil wir anders damit umgehen müssen.

Deswegen die Errungenschaft umzudrehen, um gerade die beständigen Werkstoffe zu zerlegen, statt sie als Wertstoffe möglichst lange im Kreislauf zu behalten, ist meines Erachtens der völlig falsche Weg.

Wie werden wir sie am Ende ihres Lebenszyklus dann wieder los?

Wurm: PE zu verbrennen, ist gar nicht so schlecht, auch wenn es oft als das größte Übel gesehen wird. Der Kunststoffpionier Georg Menges hat für das Material einmal den Begriff »schnittfestes Erdöl« geprägt: Denn PE hat denselben Heizwert wie Erdöl. Solange wir noch 95 Prozent unseres Öls in Autos oder anderen Anlagen verfeuern und als CO₂ in die Atmosphäre entlassen, haben die paar Prozent Plastik keinen so großen Effekt.

Endres: Ich glaube, es ist politisch nicht gewollt, weil es nicht gut klingt. Technisch und in der Wissenschaft ist man sich hingegen einig: Wenn sich Polyethylen nicht mehr recyceln lässt, ist Verbrennen auf Grund seines hohen Heizwerts das Sinnvollste.

Wir sprechen bislang nur von den Polymeren, den langen Molekülketten in den Kunststoffen. Daneben enthält fast jedes Plastik noch vielfältige weitere Stoffe in Form so genannter Additive. Was geschieht mit ihnen im Kompost oder im Boden?

Wurm: Additive sind hochspannend, können aber gleichzeitig sehr problematisch sein. Wir arbeiten unter anderem an Zusätzen, die für den Flammenschutz sorgen. Solche Chemikalien machen oft 20, 30 Prozent oder sogar mehr als die Hälfte des Gewichts eines Kunststoffs aus. Kabelummantelungen etwa enthalten häufig 60 Prozent Flammschutzadditiv. Solche Substanzen schützen uns effizient vor Feuern oder Rauchgasen. Viele werden allerdings gerade vom Markt genommen, weil sie Probleme verursachen und nicht abbaubar sind oder Mikroorganismen sowie Abwasser schädigen können. Unter ihnen befinden sich viele halogenierte aromatische Verbindungen, die ihre Funktion sehr gut erfüllen, aber ein Problem darstellen, wenn sie in die Natur gelangen. Als Alternativen dazu sind unter anderem Phosphorester sehr interessant. Denn sie können zum einen biologisch abbaubar sein und erzeugen zum anderen beim Verbrennen Radikale, welche die Flamme ersticken.

Ähnliche Verbindungen sind Antioxidanzien. Sie sollen Kunststoffen ein längeres Leben schenken, etwa ohne zu vergilben. Viele solcher Verbindungen sind jedoch giftig; deshalb will man sie jetzt ersetzen, möglicherweise durch Stoffe, die aus Holz gewonnen werden, so genannte Ligninderivate. Schließlich kennt wohl jeder das Beispiel der Weichmacher: Gerade PVC enthält sie manchmal zu bis zu 50 Prozent. Wieder andere Kunststoffe benötigen diesen Zusatz gar nicht, weil sie von sich aus weich sind.

Zum Beispiel?

Wurm: Polyolefine wie Polyethylen oder Polypropylen. Die kleineren molekularen Ketten in solchen Systemen reichen oft als Weichmacher aus und sind wesentlich unbedenklicher als andere Additive.

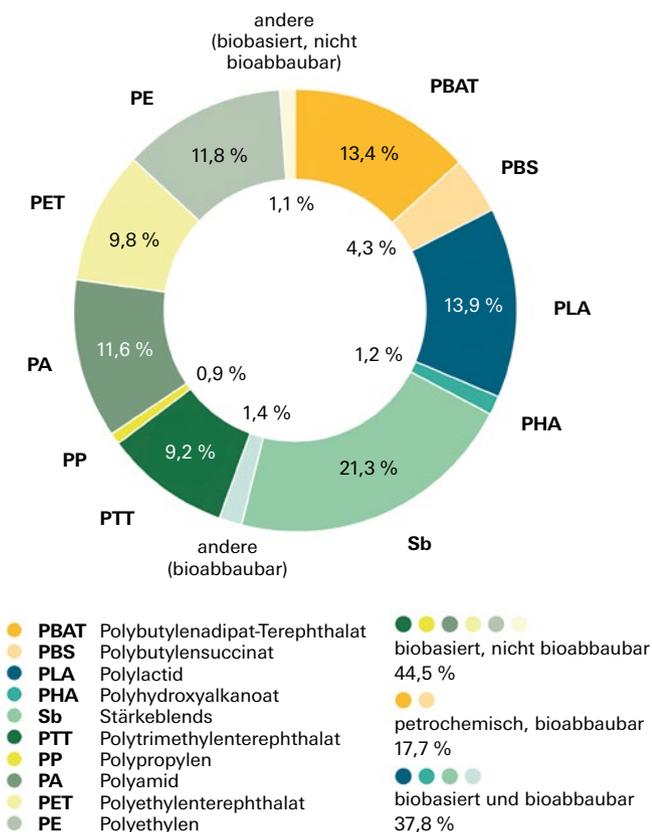
Endres: Bei der Diskussion zeigt sich die ganze Struktur und das derzeit immer deutlicher werdende Dilemma der Kunststoffindustrie. Die Entwicklung von Plastik war linear gedacht: Man hat leistungsfähige Additive geschaffen, um die Gebrauchs- und Verarbeitungsperformance zu verbessern. Die Zusätze erlauben es, ein Material sehr vielseitig zu gestalten – alles von der Verpackungsfolie bis zur hochgradig stabilisierten Kabelummantelung lässt sich dank ihnen aus demselben Polymer herstellen.

Aber jetzt ist die Zeit, in Kreisläufen zu denken. Die Additive und die damit geschaffene Vielseitigkeit stellen in meinen Augen eine der größten Herausforderungen im Bereich der Kreislaufwirtschaft dar. Bioabbaubare oder weniger bedenkliche – und möglichst mehrfach genutzte – Zusätze sind ein viel versprechender und erforderlicher Ansatz. Doch hier stehen wir wissenschaftlich noch am Anfang.

Bemüht sich die Industrie ernsthaft um Lösungen?

Endres: Die Kunststoffindustrie hat bisher meist nur nach der wirtschaftlichsten und nicht nach der nachhaltigsten Lösung gesucht. Sie nimmt immer das, was am billigsten und am wirksamsten ist, und diskutiert dann jahrelang darüber, welches von 20 bedenklchen Additiven wohl das gefährlichste ist – anstatt konsequent alle wegzulassen.

Wurm: Gerade zu Additiven gibt es jetzt einige Vorschriften: Innerhalb Deutschlands, in der EU sowie weltweit werden gewisse Substanzen verboten. Daher ist die Industrie ge-



2019 wurden global etwa 2,1 Millionen Tonnen biobasierte oder bioabbaubare Kunststoffe produziert, weniger ein Hundertstel der gesamten Plastikmenge.

zwungen, Alternativen zu finden. Auch hier sind der Branche allerdings Drop-in-Lösungen am liebsten – das heißt, ein Additiv auszutauschen, jedoch nichts am Rest des Verfahrens zu ändern. Die Frage ist, wie ökologisch das wirklich ist. Häufig sucht man nach Lücken in den Gesetztexten, um nur das giftige Produkt loszuwerden und sonst möglichst wenig umzustellen.

Endres: Ich vergleiche die Kunststoffindustrie an der Stelle mit der Automobilindustrie: Die hat leider über die letzten vielen Jahre gezeigt, was man aus einer Technologieführerschaft machen kann, wenn man sich nur die Lücke im Gesetz sucht, statt die aus ökologischer Sicht entscheidenden Dinge aktiv voranzutreiben. Dabei weiß man, was man tun muss: die Anzahl der Additive limitieren. Sinnvoll wäre ebenfalls, keine Produkte mehr zu entwickeln, die nicht in einen Kreislauf gebracht werden können. Wenn man in einer Verbundfolie neun oder elf Schichten aufeinanderklebt oder bei Textilien auf Garn- und Gewebesebene verschiedene Kunststoffe kombiniert, weiß man bereits bei der Herstellung, dass das Produkt nicht zu recyceln ist.

Können Verbraucherinnen und Verbraucher den Druck auf die Hersteller erhöhen, indem sie nachhaltigere Produkte einfordern?

Wurm: Meiner Meinung nach kann man von den Verbrauchern nicht erwarten, den Unterschied zwischen verschiedenen Biokunststoffen zu kennen und dann noch zwischen »biobasiert und abbaubar« oder »biobasiert und nicht abbaubar« und Ähnlichem zu differenzieren. In dem Zusammenhang finde ich den Begriff »Entsorgung« im Deutschen sehr schön: Denn ich will mir darüber keine Gedanken machen, ich will es aus dem Sinn haben, kurz »entsorgen«. Weil es kein einfaches System ist, muss man sich überlegen, wo man wirklich bioabbaubare Kunststoffe braucht. Das dürfen wir nicht dem Verbraucher überlassen, sondern der Gesetzgeber sollte hier sinnvoll entscheiden.

Trotzdem gibt es eine emotionale Diskussion um Biokunststoffe: Die kompostierbare Mülltüte, die nicht auf den Kompost darf, wie Sie vorhin erwähnt haben, ist ein Beispiel.

Wurm: Die Mülltüte – oder die Plastiktüte – ist quasi die Glühbirne der Verpackungsindustrie. Die will niemand haben. Aber so einfach ist es dann doch wieder nicht, wenn wir etwa an Hygienekonzepte denken, gerade im aktuellen Jahr 2020. Mit der Pandemie hat der Kunststoff wieder einen ganz anderen Stellenwert bekommen. Ich denke daher, es ist schwierig, hier eine Schwarz-Weiß-Antwort zu geben.

Endres: Man kann die Emotionen etwas aus der Diskussion nehmen, indem man Instrumente wie die Ökobilanzierung ansetzt. Dabei betrachten Wissenschaftler verschiedene Umweltkategorien. Alles, was aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt wird, benötigt beispielsweise Anbauflächen. Setzt man bei der Ökobilanz Kriterien wie Land- und Wassernutzung oder Überdüngung an, schneiden biobasierte Kunststoffe hier daher schlechter ab als petrobasierte. Denn letztere benötigen nach den derzeitigen Bewertungsmethoden keine Flächen. Die Frage ist aber, ob kontaminierte

Strände, leckende Pipelines oder vergiftetes Salzwasser – etwa durch sinkende Plattformen, Havarien sowie die Vermüllung der Meere – keine Land- oder Wassernutzung darstellen. Solche Kriterien beachten wir noch gar nicht.

Nach der derzeitigen Methodik ist die Ökobilanzierung trotzdem das Beste, was wir haben. Als Ergebnis erhält man einen Blumenstrauß ökologischer Eigenschaften. Hinsichtlich CO₂-Bilanz und globaler Erwärmung etwa schneiden die biobasierten Kunststoffe in der Regel besser ab. In einigen der 15 meistbetrachteten Umweltkategorien sind also biobasierte Kunststoffe besser, in anderen schlechter.

Das heißt, Sie können den Daumen noch nicht heben oder senken?

Endres: Aus meiner Sicht gibt es zur Kreislaufwirtschaft und der Nutzung nachwachsender Rohstoffe keine Alternative. Letztlich wird die Lösung ein Puzzle aus vielen Teilen werden, unter anderem mit dem Einsatz von CO₂ oder Algen als Rohstoffquelle. Außerdem müssen wir diskutieren, wie wir mit dem Plastik zukünftig umgehen. Denn das Material wird ja erst durch den Umgang der Menschen damit ein Problem.

Wen sehen Sie in der Verantwortung, Lösungen zu entwickeln?

Endres: Wir haben hier zu Lande sehr viele Möglichkeiten: die Kunststoffindustrie in führender Position sowie eine leistungsfähige Landwirtschaft. Es gibt Biogasanlagen zuhauf – auch aus Biomethan ließen sich einige Polymere herstellen. Außerdem verfügen wir über Bioethanol als grünen Kraftstoff und eine große chemische Industrie. Wir besitzen das Knowhow, um Kunststoffe herzustellen, zu verarbeiten und zu recyceln. Industrie und Politik müssen sich aus meiner Sicht intensiver um das Thema Biokunststoffe kümmern als in der Vergangenheit. Natürlich sind sie noch nicht wettbewerbsfähig, denn momentan konkurrieren Anlagen, die einige zehntausend Tonnen im Jahr umsetzen, mit solchen, die im gleichen Zeitraum eine Million verarbeiten. Ähnlich, wie man damals mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz die energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe unterstützt hat, könnte man jetzt die Biokunststoffe fördern. Ab einem gewissen kritischen Maß wurden Fotovoltaik, Windkraft und Co. wirtschaftlich. Das Gleiche muss man den Biokunststoffen zugestehen.

Wurm: Das sehe ich genauso. Man muss den Biokunststoffen eine Chance geben. ◀

Das Gespräch führte »Spektrum«-Redakteurin **Verena Tang**.

QUELLEN

Endres, H.-J. et al. (Hg.): Biokunststoffe unter dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit und Kommunikation. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020, als E-Book frei verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/978-3-658-27795-6>

Haider, T. P. et al.: Kunststoffe der Zukunft? Der Einfluss von bioabbaubaren Polymeren auf Umwelt und Gesellschaft. Angewandte Chemie 131, 2019

IfBB: Biopolymers, facts and statistics 2018. IfBB – Institute for Bioplastics and Biocomposites, 2018

**JETZT
NEU!**

Spektrum
GESUNDHEIT

01.20

GRÜNER TEE

Heilung für **Körper und Geist?**



5,99 € (D/A/1) | 8,50 € STR. | 63547
WWW.SPEKTRUM.DE



HYPOCHONDRIE | Angst, die krank macht
IBUPROFEN | Beliebtes Schmerzmittel mit Risiken
SPORT | Diese Ernährung führt zum Erfolg

Spektrum GESUNDHEIT

ist das neue Magazin für alle, die auf sich Acht geben, Geist und Körper schätzen und gesund leben wollen. Hier bekommen Sie sowohl tiefe Einblicke in die menschliche Physis als auch wertvolle Lifestyle- und Fitness-tips – kurz gesagt: Inspiration für ein ausgewogenes Dasein

Ab dem 4. 11. 2020 im Handel

Lernen Sie jetzt Spektrum GESUNDHEIT kennen!

service@spektrum.de | Tel. +49 6221 9126-743

Spektrum.de/aktion/gesundheit



KÜNSTLICHE INTELLIGENZ DER GESUNDE MASCHINENVERSTAND

Inzwischen können Algorithmen inhaltlich sinnvolle Zeitungsartikel verfassen. Doch wenn es darum geht, die Texte auch zu verstehen, versagen sie. Das könnte sich nun ändern: Ein neuartiger Ansatz versucht Maschinen beizubringen, logische Schlüsse zu ziehen.



John Pavlus ist Publizist und Filmmacher in Portland, Oregon, und befasst sich vor allem mit Wissenschaft, Technologie und Design. Seine Artikel erscheinen in zahlreichen Zeitschriften.

» spektrum.de/artikel/1773720

AUF EINEN BLICK KI MIT DURCHBLICK

- 1 Seit mehr als 50 Jahren versuchen Informatiker herauszufinden, wie man Computern logisches Folgern beibringen kann.
- 2 Erste Ansätze bestanden darin, riesige Datenbanken mit Informationen zu füllen, zum Beispiel: Gestapelte Holzscheite in einem Kamin plus brennende Streichhölzer ergeben Feuer.
- 3 Indem Forscher solche Datenbanken mit neuronalen Netzen verbinden, machen sie beeindruckende Fortschritte: Einige Algorithmen können dadurch plausible Schlussfolgerungen ziehen.



Denken und schlussfolgern
wie ein Mensch: Werden
Computer dazu je in
der Lage sein?

► An einem Abend im Oktober 2019 spielte der Computerwissenschaftler Gary Marcus mit einer der ausgetüfteltsten künstlichen Intelligenzen herum – und ließ sie ziemlich dumm aussehen. Dabei hatten Experten das Programm namens GPT-2 zuvor hochgelobt, weil es ihm gelang, aus wenigen vorgegebenen Sätzen sinnvolle englische Prosatexte zu produzieren. Als Journalisten von »The Guardian« es mit Passagen aus einem Bericht über den Brexit fütterten, verfasste GPT-2 ganze neue Absätze im Zeitungsstil, gefüllt mit überzeugenden politischen und geografischen Bezügen.

Marcus, ein bekannter Kritiker des aktuellen KI-Hypes, stellte dem Algorithmus eine einfache Aufgabe: »Wenn man Hölzer in einem Kamin stapelt und dann einige brennende Streichhölzer fallen lässt, dann erzeugt man normalerweise ein ...« Man könnte erwarten, dass ein System, das intelligent genug ist, um Beiträge für renommierte Zeitungen hervorzubringen, keine Schwierigkeiten haben sollte, den Satz mit dem offensichtlichen Wort »Feuer« zu vervollständigen. GPT-2 antwortete jedoch »ick« – ein englischer Ausdruck des Ekels. Als der Informatiker es noch einmal versuchte, behauptete das Programm, Streichhölzer und Holzscheite in einem Kamin führten zu einem »IRC-Kanal voller Menschen« (IRC ist die Abkürzung für Internet Relay Chat, ein textbasiertes Chatsystem).

Marcus war nicht überrascht, denn gesunder Menschenverstand stellt seit Jahrzehnten eine der größten Herausforderungen für Informatiker dar. Moderne Programme können zwar erstaunlich gut mit der menschlichen Sprache umgehen, allerdings fehlt ihnen bislang die Fähigkeit, selbst einfachste Schlussfolgerungen zu ziehen – etwa die Tatsache, dass Streichhölzer plus Holzscheite Feuer ergeben.

Über Twitter veröffentlichte Marcus seinen Austausch mit GPT-2. Als die Informatikerin Yejin Choi vom Allan Institute for Brain Science der University of Washington wenige Minuten später den Tweet entdeckte, hätte das Timing für sie kaum ungünstiger sein können. Denn eine Stunde später sollte sie auf einer renommierten KI-Konferenz einen Vortrag über ihren neuesten Algorithmus COMET halten, der eine Version von GPT-2 enthält und damit logische Schlüsse zieht.

Eine der größten Herausforderungen der Informatik

Choi stellte ihrem Programm daraufhin dieselbe Aufgabe wie Marcus, wobei sie den Wortlaut leicht an das Eingabeformat von COMET anpasste: »Gary stapelt Holzscheite und lässt Streichhölzer darauf fallen.« COMET stellte zehn Vermutungen an, warum Gary das tun könnte. Zwar ergaben nicht alle Antworten Sinn, die ersten beiden aber schon: »Er will ein Feuer entzünden« beziehungsweise »ein Feuer machen«. Zufrieden lud Choi ihre Ergebnisse als Antwort auf Marcus' Tweet hoch und fügte sie ihrer Präsentation hinzu – die hohe Wellen schlug.

In der Informatik stellt logisches Folgern nämlich eine der größten Herausforderungen dar. Manche bezeichnen es als die Dunkle Materie der KI – unverzichtbar, doch extrem schwer zu fassen. Das liegt an den unzähligen ungeschriebenen Annahmen und Faustregeln, die Menschen automa-

Sprachmodelle

Es gibt viele Algorithmen, die sowohl geschriebene als auch gesprochene Sprache verarbeiten können. Einige davon kreieren sogar Antworten, die mehrere Absätze umfassen. Die meisten derartigen Programme sind neuronale Netze, die mit zahlreichen Beispieldaten trainiert werden. Das heißt, man füttert sie mit großen Mengen an Text, wodurch der Algorithmus eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für Wortsequenzen erstellt. Auf diese Weise gelingt es den neuronalen Netzen, sinnvolle Inhalte zu generieren.

GPT-2 ist ein solches Sprachmodell des kalifornischen Unternehmens OpenAI. Die Wissenschaftler trainierten es mit Texten aus über acht Millionen Internetseiten. Dadurch kann es einen vorgegebenen Eingabetext im gleichen Sprachstil paraphrasieren und sogar verlängern, indem es diesen mit zusätzlichen Informationen anreichert.

tisch nutzen. Ein Beispiel liefert folgende Szenenbeschreibung: Ein Mann geht in ein Restaurant, bestellt ein Steak und bezahlt seine Rechnung. Wenn jemand fragt, was die Person gegessen hat, würden Sie vermutlich ohne groß nachzudenken »Steak« antworten. In diesem Fall wird allerdings nirgends erwähnt, dass der Mann überhaupt etwas gegessen hat. Der gesunde Menschenverstand ermöglicht es uns, zwischen den Zeilen zu lesen; man muss nicht alles ausdrücklich betonen.

Computer brauchen diese Informationen aber. Bereits 1958, kurz nachdem das Gebiet der KI entstand, veröffentlichte der Computerwissenschaftler John McCarthy (1927–2011) von der Stanford University eine Forschungsarbeit mit dem Titel »Programme mit gesundem Menschenverstand« (Original: »Programs with common sense«), wodurch das Thema in den Fokus der Informatiker rückte. Lange Zeit gab es jedoch kaum Fortschritte in dem Bereich. Zuerst versuchten einige Forscher, logisches Folgern in die Sprache der Computer zu übersetzen. Sie vermuteten, dass Algorithmen logische Schlüsse ziehen könnten, wenn es gelänge, alle ungeschriebenen Regeln des gesunden Menschenverstands niederzuschreiben. Dieser so genannte GOFAL-Ansatz (good old fashioned artificial intelligence) führte zu ersten Erfolgen, konnte allerdings nicht wachsen. »Die Menge an Wissen, das sich durch die Formalismen der Logik einfach darstellen lässt, ist begrenzt«, erklärt der KI-Forscher Michael Witbrock von der University of Auckland in Neuseeland.

Mit dem Aufkommen von neuronalen Netzen schöpften Informatiker wieder Hoffnung. Solche Systeme bestehen aus aufeinander folgenden Schichten künstlicher Neurone, die an den Aufbau biologischer Gehirne angelehnt sind. Die Algorithmen erkennen Muster, ohne dass Programmierer sie vorgeben müssen. In den letzten zehn Jahren entstan-

Eine der Schwierigkeiten besteht darin, dass es zu jedem Fall Ausnahmen gibt. »Eine Aussage wie ›es regnet‹ könnte bedeuten, dass man nass wird, wenn man nach draußen geht – das stimmt aber nicht, wenn man unter einer Abdeckung steht«, erläutert Pavlick. Dieses Beispiel ist noch vergleichsweise einfach; andere Fälle sind hingegen schwerer vorzusehen. Eine digitale Wissensdatenbank wie Cyc kann Dutzende von Aussagen darüber enthalten, was typischerweise passiert, wenn eine Person in einem Restaurant etwas zu essen bestellt. Doch was ist mit der endlos erscheinenden Liste seltener oder ungewöhnlicher Situationen, die eintreten können: falls beispielsweise jemand die Zeche prellt oder eine Gruppe von Personen eine Essensschlacht beginnt? »Die Möglichkeiten nehmen kein Ende«, sagt Choi. »Deshalb sind rein wissensbasierte Ansätze dem Untergang geweiht.«

Selbst wenn es möglich wäre, eine Datenbank aufzubauen, die 100- oder 1000-mal so umfassend ist wie alle bisherigen, haben KI-Systeme eine weitere Schwäche: Sie können nicht mit der Mehrdeutigkeit unserer Sprache umgehen. Wenn eine Bedienung in einem Restaurant einen Gast fragt: »Sind Sie schon fertig?«, möchte sie wissen, ob die Person die Reste auf dem Teller noch aufessen möchte. Stellt die Bedienung dagegen dieselbe Frage an einen Koch, der eine Bestellung bearbeitet, bedeutet das etwas ganz anderes. Eine KI kann klar definierte Beziehungen hervorragend erlernen und anschließend anwenden. Sobald es hingegen darum geht, assoziative Überschneidungen unserer Sprache zu erfassen, versagen die Systeme.



METAMORWORKS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Als Choi 2018 ihre Stelle am Allen Institute antrat, hegte sie die Vermutung, dass neuronale Netzwerke die logische Argumentation in der KI voranbringen könnten. Sie wusste zu diesem Zeitpunkt noch nicht genau, wie. Anders als viele ihrer Kollegen wollte sie die früheren Ansätze nicht ganz abschreiben. Daher entwickelte sie mit ihrem Team eine eigene Wissensdatenbank, die sie Atomic (kurz für: atlas of machine commonsense) nannten. »Im Grunde wollte ich eine Art Lehrbuch für neuronale Netze schreiben«, sagt Choi. »Als wir damit fertig waren, veröffentlichte OpenAI plötzlich GPT-2.«

Dieses neuronale Netzwerk war nur eines von vielen vortrainierten Sprachmodellen, die Anfang 2019 entstanden und für Aufregung sorgten. Denn derartige Algorithmen haben die Art und Weise revolutioniert, wie Computer menschliche Sprache verarbeiten. Sie halten sich dabei nicht an feste Regeln, sondern nutzen statistische Methoden, um Inhalte zu verarbeiten. Dadurch können sie sogar

mit verrauschten oder mehrdeutigen Eingaben umgehen. Wenn solche Sprachprogramme eine bestimmte Aufgabe gelernt haben – etwa schriftliche Fragen zu beantworten oder Texte zu paraphrasieren –, wirkt es so, als würden sie das Gelesene verstehen.

Diese so genannten Sprachmodelle ermöglichten es Choi, Algorithmen mit einer Art gesundem Menschenverstand auszustatten. Indem sie die neuronalen Netze mit der Atomic-Datenbank schulte, entstand COMET. Dieses Programm hat den Vorteil, dass es die Wissenslücken von Atomic ganz von selbst mit plausiblen Schlüssen füllen kann. Und zwar auf dieselbe Weise, wie GPT-2 gelernt hat, sinnvolle Nachrichtenartikel zu generieren: Anhand der Beispieldaten erstellt es eine Wahrscheinlichkeitsverteilung darüber, wie Inhalte miteinander zusammenhängen.

Gutachter befinden 77,5 Prozent der KI-Aussagen für plausibel

Übergibt man COMET eine Aussage in Alltagssprache, können zwei Fälle eintreten: Die Eingabe ist bereits in der Datenbank des Systems enthalten (zum Beispiel: Wenn man Essen in einem Restaurant bestellt, verzehrt man es üblicherweise auch), wodurch das Programm die Information einfach verarbeiten kann. Hat man dem Algorithmus allerdings ein unbekanntes Szenario übergeben, stellt es eine statistische Schätzung an – und überraschenderweise erweist sich diese häufig als schlüssig. Im Durchschnitt befanden menschliche Gutachter 77,5 Prozent der von COMET geschätzten Antworten für plausibel. Damit schneidet es nur um etwa zehn Prozentpunkte schlechter als Menschen ab (die Gutachter erachteten 86 Prozent der Einträge in der Wissensdatenbank für plausibel). Als COMET die Eingabe »Person X gibt Person Y Medikamente« erhielt, vermutete es, dass X Y helfen wollte. Wurde der KI dagegen gesagt, dass Person X die Frau von Person Y ermordet hat, ging COMET davon aus, dass X die Leiche verstecken wollte.

Die Ergebnisse beeindruckten mich so stark, dass ich Choi Ende 2019 in ihrem Labor in Seattle aufsuchte. Unter anderem wollte ich mich dort vergewissern, wie COMET mit mehrdeutigen und falsch formulierten Aussagen umgeht. Daher übergab ich dem Programm folgenden Satz meiner fünfjährigen Tochter auf Englisch: »Papa gehe zu Arbeit (Daddy goed to work).«

Choi runzelte die Stirn. »Das könnte knifflig werden«, sagte sie. Aber COMET meisterte die Aufgabe problemlos. Es mutmaßte, dass »Papa Geld verdient«, »seine Arbeit macht« und »einen Gehaltsscheck bekommt«; dass er als fleißig, motiviert und pflichtbewusst angesehen werde; und sich andere deshalb stolz, dankbar und verärgert fühlen – Letzteres spiegelt wohl die Emotion meiner Tochter wider, wenn ich zur Arbeit gehe, anstatt mit ihr zu spielen. »Das würde mit Cyc sicher nicht funktionieren«, bemerkt Choi. »Es sei denn, jemand bringt dem Programm zuvor explizit bei, dass ›gehte‹ eigentlich ›ging‹ bedeutet – was wir nie getan haben.«

Um die Fortschritte im Bereich der KI in einen realistischen Kontext zu rücken, nutzt Marcus häufig folgende Analogie: »Nur weil man eine Leiter perfektioniert, heißt

Eine noch leistungsfähigere KI

Am 11. Juni 2020 hat das kalifornische Softwareunternehmen OpenAI die Betaversion des Nachfolgers von GPT-2, Generative Pre-trained Transformer 3 (GPT-3), veröffentlicht. Schnell machte die neue KI Schlagzeilen: Neben Übersetzungen und simplen arithmetischen Aufgaben kann der Algorithmus sogar verbale Befehle in Programmcode umwandeln.

Am 20. Juli generierte der Student Liam Porr von der University of California mit Hilfe von GPT-3 einen Blog-Post, der es auf den ersten Platz von »Hacker News« schaffte, einer unter Informatikern beliebten Social-News-Website. Als Porr

bekannt gab, dass der Eintrag gar nicht von ihm stammte, sondern von einer Maschine, versetzte er die Welt in Erstaunen.

So beeindruckend die Leistungen auch sind, steckt hinter GPT-3 allerdings nichts grundlegend Neues. Wie sein Vorgänger ist es ein statistisches Sprachmodell, das die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der ein Wort auf ein anderes folgt. Dabei bezieht es bis zu 2048 Eingaben – etwa Wörter oder Symbole – mit ein.

Die Fortschritte gegenüber GPT-2 erreicht das Nachfolgemodell durch die enorme Menge an Parametern und Daten, mit denen sich

das Programm immer weiter verbessert. Es enthält 175 Milliarden Parameter – etwa 100-mal mehr als sein Vorgänger –, zudem nutzten die Entwickler zirka 570 Gigabyte an Text, um das Netzwerk zu trainieren, was mehr als einer Billion Wörtern entspricht.

Mit diesen riesigen Datenmengen ist die KI zwar in der Lage, die Leistungen von GPT-2 zu übertreffen. Weil sich die zu Grunde liegende Technologie jedoch nicht von den bestehenden Programmen unterscheidet, ist man damit einer Maschine, die logische Schlüsse wie ein Mensch zieht, aber nicht näher gekommen.

das noch lange nicht, dass man sie bis zum Mond bauen kann.« Für ihn und andere Experten hat der COMET-Ansatz das gleiche grundlegende Problem wie alle Deep-Learning-Algorithmen: Statistik heißt nicht Verständnis. »COMET leistet anständige Arbeit, indem es einige der Parameter errät, die ein Satz enthalten könnte. Das tut es allerdings nicht auf konsistente Weise«, erklärt Marcus. So wie keine Leiter jemals zum Mond reichen wird, gibt es kein neuronales Netzwerk, das wirklich weiß, was ein angezündetes Streichholz auf gestapelten Holzscheiten auslöst.

Choi teilt diese Ansicht. Sie räumt ein, COMET stütze sich auf oberflächliche Muster in Daten und verstehe die Konzepte nicht wirklich, wenn es eine Antwort generiert. »Aber die Tatsache, dass es dabei derart gut abschneidet, ist bereits ein beeindruckender Fortschritt«, findet die Informatikerin.

Einige Wissenschaftler sind der Meinung, man solle den Programmen neben Texten auch visuelle Wahrnehmungen und körperliche sowie psychische Empfindungen übergeben, damit sie logische Schlüsse ziehen können. »Selbst in einer Welt ohne andere Personen zum Reden besäße man gesunden Menschenverstand – man würde immer noch verstehen, wie die Welt funktioniert, und Erwartungen darüber haben, was man sieht und was nicht«, sagt Pavlick, die derzeit KI-Systeme mit einer virtuellen Realität interagieren lässt, damit sie logisches Schließen erlernen. Für sie stellt COMET einen aufregenden Fortschritt dar, »was jedoch fehlt, ist der eigentliche Referenzaspekt. Das Wort »Apfel« ist kein Apfel. Diese Bedeutung muss in einer Form existieren, die über die bloße Sprache hinausgeht.«

Nazneen Rajani, eine leitende Wissenschaftlerin bei der US-amerikanischen Softwarefirma Salesforce, verfolgt ein ähnliches Ziel. Sie glaubt jedoch, das Potenzial neuro-

ner Sprachmodelle sei noch lange nicht ausgeschöpft. Deshalb untersucht sie mit ihrem Team, ob neuronale Netze simple mechanische Zusammenhänge lernen können, etwa dass eine Kugel aus einem Trinkglas herausrollt, wenn dieses umkippt.

Choi und ihre Kollegen versuchen momentan COMET mit beschrifteten visuellen Szenen zu trainieren. »Wir haben zahlreiche Bilder aus Filmen oder Fernsehsendungen entnommen, in denen interessante Dinge geschehen«, sagt Choi. Die Ergebnisse erscheinen viel versprechend. Selbst wenn die neuronalen Netze wie COMET nicht zum Mond gelangen können, sind sie Chois Meinung nach zurzeit der einzige Weg, um ihnen überhaupt nahe zu kommen. ◀

QUELLEN

Bosselut, A. et al.: COMET: Commonsense transformers for automatic knowledge graph construction. ArXiv 1906.05317, 2019

Park, J.S. et al.: Visual commonsense graphs: Reasoning about the dynamic context of a still image. ArXiv 2004.10796, 2020

Sap, M. et al.: ATOMIC: An atlas of machine commonsense for if-then reasoning. ArXiv 1811.00146, 2018

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Common Sense Comes Closer to Computers« 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.



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN VIELE WEGE FÜHREN DURCH MANHATTAN

Im Zuge der Covid-19-Pandemie hat der Abstandsbegriff an Aktualität gewonnen. Nicht nur in der Mathematik ist er vielfältig, er kann auch im Alltag zu Verwirrung führen. Und bekommt in der digitalen Welt ganz neue Anwendungsmöglichkeiten.



Dustin Schiering ist Physikdidaktiker am Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel.

» spektrum.de/artikel/1773723

Als ich meinen New-York-Urlaub plante, beschloss ich, mich in Manhattan einzuquartieren. Weil ich ursprünglich aus einer ländlichen Gegend komme, wollte ich aber bei meinem Aufenthalt nicht auf etwas Natur und Grün verzichten. Bei der Zimmersuche achtete ich also darauf, dass das Hotel nahe an einem schönen Park gelegen ist, von denen es in Manhattan glücklicherweise viele gibt. Und so fand ich nach einiger Zeit eine nette Unterkunft, die meinen Ansprüchen entsprach.

Auf der Website warb das Hotel damit, ein Park sei nur 1,4 Kilometer entfernt – was im knapp 60 Quadratkilometer großen Manhattan eine vergleichsweise kurze Distanz darstellt. Nachdem ich das Zimmer gebucht hatte, sah ich mir die Lage der Unterkunft noch einmal genauer auf einer Karte an. Und da entdeckte ich, dass man zu Fuß knapp 2 Kilometer zum Park laufen muss – und nicht wie angegeben bloß 1,4.

Hat das Hotel wissentlich mit falschen Angaben geworben, oder waren die Mitarbeiter einfach nicht vertraut genug mit unserem Maßsystem? Beide Vorwürfe erwiesen sich als falsch. Misst man die Luftlinie zwischen Hotel und Park, beträgt die Entfernung tatsächlich nur 1,4 Kilometer (siehe Abbildung S. 76). Der Fußweg, den man entlang der rechteckig angeordneten Straßen zurücklegen muss, ist allerdings länger. Es gibt also zwei Möglichkeiten, um die Distanz zwischen Unterkunft und Park anzugeben, die sich um mehr als einen halben

Kilometer unterscheiden. Trotzdem sind beide Angaben korrekt.

Das Beispiel verdeutlicht etwas, was zumindest in der Mathematik schon lange bekannt ist: Die Entfernung zwischen zwei Orten ist nicht eindeutig. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine Distanz zu messen – wenngleich eine Variante in manchen Situationen sinnvoller erscheinen mag als die anderen.

Um Verwirrungen wie bei meiner Hotelbuchung zu vermeiden, haben Mathematiker einen abstrakten Abstandsbegriff eingeführt: Zuordnungen, so genannte Metriken, bestimmen die Distanz zwischen zwei Punkten. Das heißt, eine Metrik weist einem Punktepaar durch eine Rechenvorschrift eine reelle Zahl zu, die wir als Entfernung bezeichnen.

Doch nicht jede Zuordnung darf sich Metrik nennen. Dafür muss sie drei Eigenschaften erfüllen: Die Distanz zweier Punkte darf niemals kleiner als null sein (positive Definitheit) – wobei sie nur genau dann null ist, wenn es sich um den Abstand von einem Punkt zu sich selbst handelt. Zudem muss die Entfernung zwischen zwei Punkten A und B dieselbe sein wie jene zwischen B und A (Symmetrie). Und zuletzt ist die Distanz zwischen A und C stets kleiner gleich der Summe der Abstände zwischen A und B sowie B und C (Dreiecksungleichung). Die letzte Eigenschaft besagt, dass die Entfernung zwischen A und C durch einen Umweg über B bestenfalls gleich groß, andernfalls größer – aber niemals kleiner – wird.

Die Eigenschaften decken sich weitestgehend mit unserem alltäglichen Verständnis von Abständen – oder haben Sie schon einmal einen Längenunterschied beobachtet, der davon abhing, an welchem der beiden Objekte Sie das Maßband ansetzten?

Erfüllt eine Zuordnung alle drei genannten Bedingungen, entspricht sie einer Metrik, und man kann mit ihrer Hilfe die Distanz zwischen beliebigen Punktepaaren einer



PREMIUM PHOTOGRAPHY GEMMY IMAGES / ISTOCK

In Manhattan sind die Straßen in einem rasterförmigen Muster angeordnet.

Menge berechnen. Weil die drei Forderungen jedoch nicht sehr streng sind, treffen sie auf extrem viele (tatsächlich beliebig viele) Zuordnungen zu. Dementsprechend lassen sich etliche verschiedene Abstände zweier Punkte definieren, die zu unterschiedlichen Situationen passen.

Einige Metriken, die in der Mathematik und in den Naturwissenschaften häufig vorkommen, tragen sogar eigene Namen. Das vermutlich bekannteste Beispiel ist die euklidische Metrik. Hier subtrahiert man beide Punkte zunächst komponentenweise, das heißt, man zieht von der ersten Koordinate des Punkts A die erste Koordinate des Punkts B ab, von der zweiten A-Koordinate die zweite B-Koordinate und so weiter. Anschließend quadriert man die einzelnen Differenzen, addiert sie auf und zieht als letzten Schritt die Wurzel aus der so erhaltenen Summe.

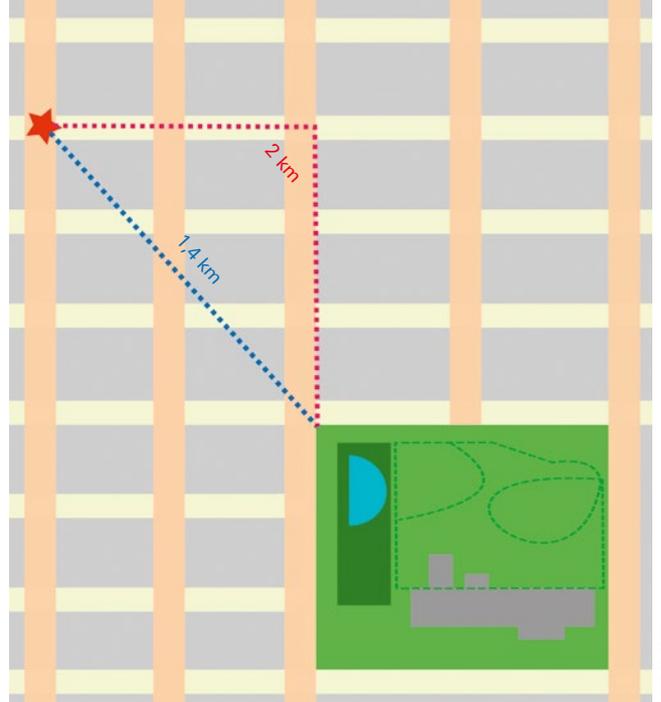
Falls man den euklidischen Abstand zweier Punkte A und B in der Ebene (\mathbb{R}^2) berechnet, lässt sich das Ergebnis grafisch recht einfach interpretieren. Haben die beiden Punkte zum Beispiel die Koordinaten $A = (6,5)$ und $B = (3,1)$, beträgt ihre euklidische Distanz folglich $\sqrt{(6-3)^2 + (5-1)^2} = 5$. Das entspricht der Länge der Strecke, welche die Punkte A und B auf direktem Weg verbindet. Damit misst die euklidische Metrik zumindest in der Zahlenebene \mathbb{R}^2 oder im Zahlenraum \mathbb{R}^3 das, was wir im Alltag häufig als Entfernung bezeichnen. Diese Metrik nutzte das New Yorker Hotel auf seiner Website, um die Distanz zum nächsten Park anzugeben.

Verschiedene Abstände in hohen Dimensionen

Ein geeigneterer Abstandsbegriff wäre in dieser Situation jedoch ein anderer gewesen, den man mit der so genannten Manhattan-Metrik berechnet. Dabei subtrahiert man zunächst, wie bei der euklidischen Metrik, die Koordinaten zweier Punkte komponentenweise, summiert dann aber die Beträge der Differenzen. Für das zuvor genannte Beispiel der Punkte A und B ergibt sich daraus ein Abstand von $|6-3| + |5-1| = 7$. Anschaulich gesehen entspricht das der Strecke, die man gehen müsste, wenn man von A aus zunächst der ersten Koordinatenachse folgt, anschließend abbiegt und den Weg entlang der senkrecht dazu befindlichen Achse bis B durchläuft. Eine solche Distanz müsste beispielsweise ein Taxi zurücklegen, das sich entlang rechteckig angeordneter Straßen schlängelt. Die Metrik verdankt ihren Namen dem Stadtbild Manhattans, das einem solchen Schachbrettmuster ähnelt. Es gibt aber auch in Deutschland Städte, die ein vergleichbares Straßennetz aufweisen, etwa Neuruppin oder Mannheim.

Der Abstandsbegriff lässt sich nicht nur für Punkte aus der Zahlenebene \mathbb{R}^2 berechnen, sondern man kann ihn auch auf n -dimensionale Zahlenräume anwenden. Bei der euklidischen Metrik geht man dabei wie im zweidimensionalen Fall vor: Haben die n -dimensionalen Punkte die Koordinaten $A = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ und $B = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, beträgt ihr euklidischer Abstand $\sqrt{(x_1-y_1)^2 + \dots + (x_n-y_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i-y_i)^2}$, während die Manhattan-Distanz $\sum_{i=1}^n |x_i-y_i|$ ergibt.

Interessanterweise fällt im \mathbb{R}^n der euklidische Abstand immer kleiner aus als die Manhattan-Distanz. In zwei Dimensionen ist die Begründung dafür offensichtlich: Die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten A und B ist



DUSTIN SCHIERING

Nicht immer ist klar, welche Distanz gemeint ist, wenn jemand eine Entfernung angibt. Ist es die Luftlinie (blau) oder der tatsächlich zu bewältigende Weg (rot)?

der direkte Weg; läuft man dagegen von A über C nach B, kann die Strecke nur länger werden. Für höhere Dimensionen ist das allerdings nicht direkt ersichtlich – was unter anderem daran liegt, dass sich die Fälle $n > 3$ nicht mehr grafisch darstellen lassen. Daher braucht man einen formalen Beweis, dem zufolge die direkte Verbindung auch im Fall von \mathbb{R}^n niemals länger ist als die Summe der Abstände entlang jeder Koordinate.

Das gilt übrigens nicht für eine Kugeloberfläche. Hier ist die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten keine gerade Linie, sondern Teil eines Kreises. Deshalb haben transkontinentale Flugrouten die Form eines Kreisbogens, einer so genannten Orthodrome.

Besonders interessant wird es, wenn man Metriken nicht auf Punkte des \mathbb{R}^n oder einer Kugeloberfläche anwendet, sondern auf allgemeinere Mengen. Tatsächlich müssen deren Elemente dabei nicht einmal Zahlen sein. Zum Beispiel lässt sich ein Abstandsbegriff für Buchstabenfolgen definieren, wie es die so genannte Levenshtein-Metrik tut. Sie berechnet die kleinste Anzahl an Einfüge-, Lösche- und Austausch-Ersetze-Operationen, um zwei Zeichenketten A und B ineinander umzuwandeln. Für $A = \text{Hund}$ und $B = \text{Haus}$ beträgt der Levenshtein-Abstand beispielsweise drei (ersetze u durch a, lösche n, ersetze d durch s).

Linguisten nutzen die Levenshtein-Metrik, um herauszufinden, wie sehr sich Sprachen oder Dialekte ähneln. Damit können sie kulturelle Zusammenhänge bis hin zu Verwandtschaften zwischen Sprachräumen erkennen. Zudem verwenden einige Rechtschreibprüfungsprogramme diesen Abstandsbegriff: Identifiziert der Algorithmus eine unbekannte Zeichenfolge, die nicht im Wörterbuch gespeichert ist, etwa »Humd«, berechnet er den Levenshtein-Abstand zu allen übrigen gespeicherten Wörtern. Anschließend schlägt er dem Nutzer eine Korrektur mit der kleinsten Distanz vor.

Heutige Rechtschreibprüfungsprogramme berücksichtigen darüber hinaus noch andere Faktoren wie Grammatik, Zeichensetzung sowie Phonetik und beziehen häufige Fehler mit ein. Dadurch sollen die Algorithmen bei simplen Buchstabendrehern wie »Huas« das Wort »Haus« und nicht »Hass« als Lösung liefern, obwohl beide den gleichen Levenshtein-Abstand von zwei besitzen.

Noch vielfältiger werden die Anwendungsmöglichkeiten, wenn man die Anforderungen an eine Metrik abschwächt. Ein Beispiel dafür stellt ein so genanntes Ähnlichkeitsmaß dar. Solche Zuordnungen müssen symmetrisch sein (wenn A B ähnelt, muss B A auf gleiche Weise ähneln), zudem ist ein Objekt sich selbst stets ähnlicher als allen übrigen Objekten. Man kann schnell erkennen, dass jede Metrik ein Ähnlichkeitsmaß darstellt, aber eben nicht umgekehrt.

Die Tricks der Empfehlungsalgorithmen von Netflix und Co

Ein bekanntes Beispiel ist das Kosinusmaß zwischen zwei Punkten A und B im \mathbb{R}^n : Dazu verbindet man A und B jeweils mit dem Ursprung des Koordinatensystems, wobei der Kosinus des Winkels zwischen den beiden Linien als Maß für ihre Ähnlichkeit dient. Punkte gelten also genau dann als ähnlich, wenn der von ihnen eingeschlossene Winkel klein ist.

Ein weiteres weit verbreitetes Ähnlichkeitsmaß ist das so genannte Pearson-Maß, das die Stärke eines linearen Zusammenhangs misst. Was das bedeutet, zeigt sich, wenn man das Maß auf mehrere Punkte gleichzeitig anwendet: Sie gelten als ähnlich, wenn sie auf einer Geraden liegen. Bei völlig zufällig verteilten Punkten beträgt das Pearson-Maß null, befinden sie sich dagegen auf einer perfekten Geraden, nimmt das Pearson-Maß die Werte eins oder minus eins an, je nachdem, ob die Steigung positiv oder negativ ist.

Inzwischen sind Ähnlichkeitsmaße aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Internetplattformen wie Netflix, Amazon, Google oder Spotify verwenden solche Abstands begriffe, mit denen sie ihren Kunden passende Produkte, Filme oder Musik vorschlagen. Obwohl die dazugehörigen Algorithmen extrem kompliziert und teilweise geheim sind, lässt sich die zu Grunde liegende Idee recht einfach darstellen.

Um Empfehlungen auszusprechen, brauchen die Anbieter sowohl Informationen über ihre Nutzer als auch zu den entsprechenden Produkten. Eine verbreitete Methode, solche Daten zu sammeln und aufzubereiten, ist der so genannte kollaborative Ansatz, der auf den Bewertungen der Kunden basiert. Bei k verschiedenen Nutzern n_1, n_2, \dots, n_k sowie l verschiedenen Produkten p_1, p_2, \dots, p_l lässt sich zum Beispiel eine $l \times k$ -Matrix erstellen, welche die abgegebenen Bewertungen enthält: $V = (b_{11} \ b_{12} \ \dots \ b_{1l})$
 $(b_{21} \ b_{22} \ \dots \ b_{2l}) \ \dots$ (zeilenweise ausgedrückt), wobei der Eintrag b_{ij} die Bewertung des Produkts j von Nutzer i darstellt.

Mit einem Ähnlichkeitsmaß, etwa dem Kosinusmaß, hat der Anbieter nun zwei verschiedene Möglichkeiten, die Daten auszuwerten: Entweder er berechnet die Ähnlichkeit

zwischen den Produkten oder den Nutzern. Wofür er sich entscheidet, ist grundlegend für die zukünftigen Empfehlungen. Sollten sie auf vergleichbaren Produkten oder auf den Käufen ähnlicher Personen beruhen?

Entscheidet man sich für die zweite Variante, muss man die Ähnlichkeiten zwischen allen Nutzern berechnen. Das funktioniert wie im Zahlenraum \mathbb{R}^n : Jeder Punkt steht für einen Nutzer, und die dazugehörige Koordinate entspricht der Bewertung eines Produkts. Man bestimmt die Ähnlichkeit zwischen den Punkten (den Nutzern) gemäß ihren Koordinaten (den Bewertungen). Das Ergebnis ist dann wieder eine Matrix, deren Einträge a_{kl} darstellen, wie ähnlich sich Nutzer k und l sind.

Damit kann man für jeden Kunden so genannte Nachbarn bestimmen, deren Bewertungen weitestgehend mit seinen übereinstimmen. Hat man die Nachbarn identifiziert, lässt sich in der ursprünglichen Matrix V ablesen, welche Produkte sie positiv beurteilt haben. Diese kann man dem entsprechenden Nutzer dann vorschlagen.

In der Realität verwenden Dienste wie Google, Spotify oder Netflix nicht ausschließlich den kollaborativen Ansatz, sondern zusätzlich andere Empfehlungssysteme. Zum Beispiel erweitern einige Anbieter ihre Daten des kollaborativen Systems, indem sie sich nicht nur auf die Bewertungen von Kunden beschränken, sondern zusätzlich Produktinformationen wie Größe und Preis miteinbeziehen.

Solche hybriden Empfehlungssysteme führen zu zuverlässigeren Algorithmen. Allerdings haben derartige Ansätze auch mit Problemen zu kämpfen. Eine Schwierigkeit ergibt sich für alle Methoden bei neuen Kunden oder Produkten. Denn in dem Fall fehlen die nötigen Bewertungen, um die entsprechenden Ähnlichkeiten zu berechnen. Firmen wie Netflix lassen neue Nutzer daher bereits bei der Registrierung Serien oder Filme auswählen, die ihnen gefallen. Somit kann der Dienst zumindest eine vorläufige Ähnlichkeitsmatrix erstellen.

Einige Anbieter verwenden Empfehlungssysteme nicht nur, um passende Produkte vorzuschlagen, sondern auch, um Nutzer personalisiert zu bewerben. Netflix passt beispielsweise das Vorschaubild und den Trailer einer bestimmten Serie oder eines Films an seine Kunden an. Hat Person A etwa eine Vorliebe für Krimis, während B Actionfilme bevorzugt, dann bewirbt Netflix die Serie X für A und B verschieden, indem es Trailer und Vorschaubild abstimmt. Es ist also kein Zufall, dass sich das Vorschaubild von Serien und Filmen mit der Zeit ändert. Es ist das Ergebnis einer aktualisierten Ähnlichkeitsmatrix. Das zeigt, wie bedeutend Ähnlichkeitsmaße sind – insbesondere wenn es darum geht, personalisiert zu werben und so die Wahrscheinlichkeit für den Konsum zu steigern. ◀

QUELLEN

Bell, R. M. et al.: The BellKor solution to the Netflix Grand Prize. 2009

Molina Fernández, L. E., Bhulai, S.: Recommendation system for Netflix. Magisterarbeit, Freie Universität Amsterdam, 2018

Santini, S., Jain, R.: Similarity Measures. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 21, 1999

ARCHÄOLOGIE EUROPAS ERSTE METROPOLEN

Auf den fruchtbaren Böden zwischen den ukrainischen Flüssen Prut und Dnjepr ließen sich um 4100 v. Chr. tausende Menschen nieder. Die bäuerliche Bevölkerung errichtete Planstädte und war gemeinschaftlich organisiert. Doch die zivilisatorische Blüte endete jäh.



In der Zentralukraine haben Forscher bisher 15 kupferzeitliche Großsiedlungen entdeckt, darunter Maidanetske (Rekonstruktion oben) sowie die nahe gelegenen Taljanky und Dobrovody. Die Fundplätze liegen zirka 45 Kilometer von der modernen Stadt Uman entfernt in einer heute landwirtschaftlich geprägten Region, die im 4. Jahrtausend v. Chr. mit zahlreichen Waldinseln durchsetzt war.

POP. JÜR. / BETTY IMAGES / ISTOCK
BEARBEITUNG: STEPHAN DER WISSENSCHAFT

SUSANNE BEYER, INSTITUT FÜR UR- UND FRÜHGESCHICHTE, ULM NIEL

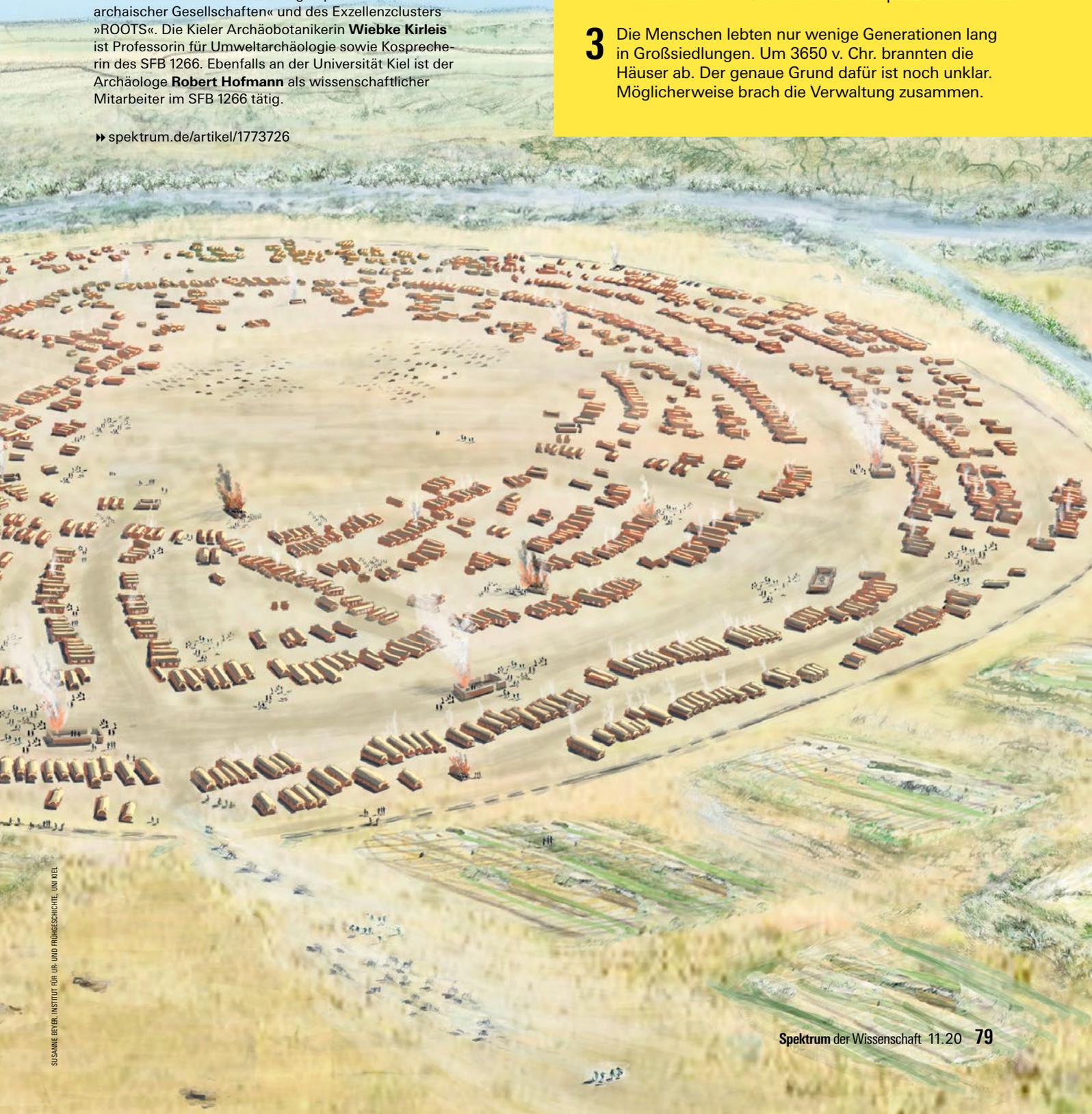


Johannes Müller ist Professor für Prähistorische Archäologie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Leiter zahlreicher Grabungs- sowie Feldforschungsprojekte und Sprecher des DFG-geförderten Sonderforschungsbereichs »SFB 1266 TransformationsDimensionen: Mensch-Umwelt-Beziehungen prähistorischer und archaischer Gesellschaften« und des Exzellenzclusters »ROOTS«. Die Kieler Archäobotanikerin **Wiebke Kirleis** ist Professorin für Umweltarchäologie sowie Kosprecherin des SFB 1266. Ebenfalls an der Universität Kiel ist der Archäologe **Robert Hofmann** als wissenschaftlicher Mitarbeiter im SFB 1266 tätig.

» spektrum.de/artikel/1773726

AUF EINEN BLICK BÄUERLICHES GROSSSTADTLIBEN

- 1** Vor rund 6000 Jahren gründeten Bauerngesellschaften in der heutigen Ukraine ausgedehnte Siedlungen. Die Verteilung der Bauten zeigt: Es waren Planstädte.
- 2** Die so genannte Tripolje-Kultur beruhte auf Ackerbau und Viehzucht. Wie die Gesellschaft organisiert war, verraten etwa die Überreste am Fundplatz Maidanetske.
- 3** Die Menschen lebten nur wenige Generationen lang in Großsiedlungen. Um 3650 v. Chr. brannten die Häuser ab. Der genaue Grund dafür ist noch unklar. Möglicherweise brach die Verwaltung zusammen.

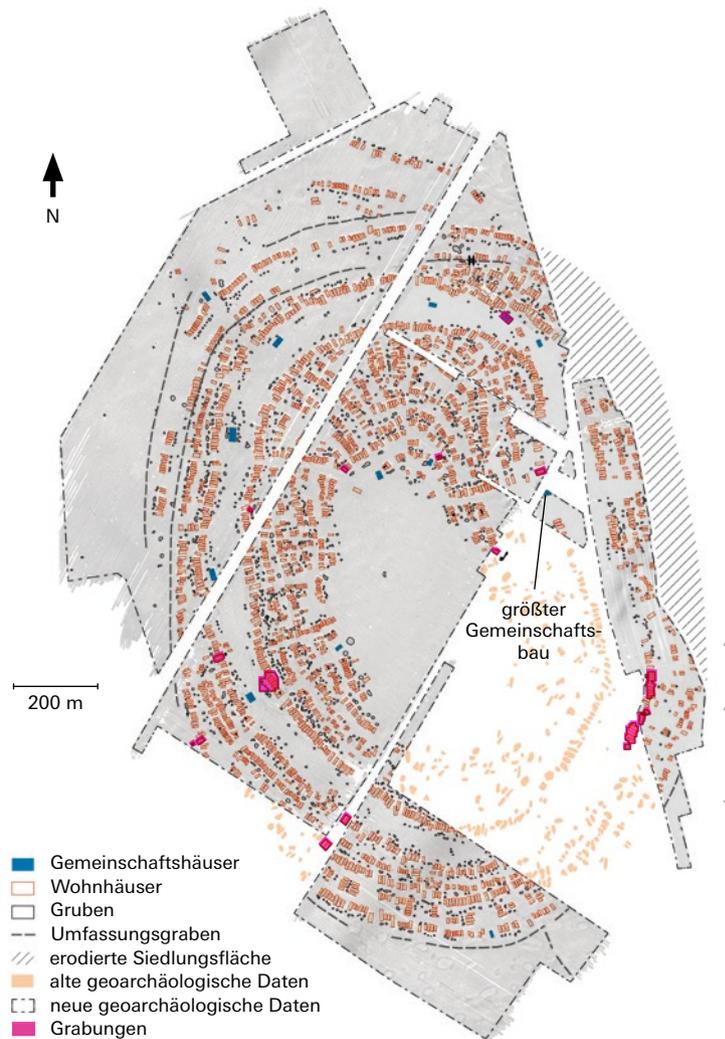


Im Boden der Ukraine schlummert ein kostbarer Schatz: Schwarzerde. Der fruchtbare Untergrund hatte sich auf den weit reichenden Lössarealen des Landes gebildet – und zwar durch das Zutun des Menschen. Erst als Wälder gerodet und Flächen urbar gemacht wurden, entstand auch die Schwarzerde. Diese Entwicklung begann vielleicht schon um 4800 v. Chr. Zu jener Zeit ließen sich die ersten Bauern in der Region zwischen den Flüssen Prut und Dnjepr nieder und betrieben Ackerbau und Viehzucht. Zwischen 4100 und 3650 v. Chr. profitierten die Bewohner der Region ganz besonders von der exzellenten Bodengüte. Sie gründeten riesige Siedlungen mit bis zu 1700 gleichzeitig bewohnten Häusern. In Europa hatte es zuvor nichts Vergleichbares gegeben.

Die ersten Zeugnisse entdeckten vor rund 130 Jahren Gelehrte aus Kiew. Dann dokumentierten vor etwa 50 Jahren sowjetische Luftbildarchäologen und Geophysiker im großen Stil die Überreste der Riesensiedlungen und ordneten sie der Tripolje-Kultur zu: kupferzeitlichen beziehungsweise chalkolithischen Gesellschaften, die in der Waldsteppenlandschaft der Ukraine und Moldawiens lebten. Die so genannten Megasites, die sich auf Flächen von bis zu 200 Hektar erstreckten, finden sich vor allem in der Zentralukraine. Rund 15 solcher Stätten mit mehr als 100 Hektar Größe sind bekannt. Rechnet man mit fünf Bewohnern pro Wohnhaus, dann zählten die Orte bis zu 15000 Menschen. Doch die Siedlungen existierten nur für relativ kurze Zeit – zwischen 150 und 200 Jahre. Danach wurden sie verlassen und niedergebrannt.

Ihr Ende und vor allem ihre außergewöhnlichen Dimensionen werfen Fragen auf – nach der wirtschaftlichen und sozialen Organisation der Bevölkerung und danach, wie sich dem Land genügend Erträge abtrotzen ließen. Überhaupt: Wie war es möglich, so viele Menschen mit den Mitteln kupferzeitlicher Agrartechnik zu versorgen? Die archäologische Fundsituation legt nahe, dass es sich bei den Siedlungen um regelrechte Städte handelte. Vollzog sich demnach in der ersten Hälfte des 4. Jahrtausends v. Chr. in der Schwarzmeeressteppe ein Urbanisierungsprozess, wie er für jene Zeit bisher nur aus Mesopotamien und etwas später aus dem Indus oder Ägypten bekannt ist?

Seit die ersten Bauern um 6400 v. Chr. Europa erreicht hatten, lebten die Menschen in eher kleinen Siedlungen oder auf einzelnen Höfen. Archäologen identifizierten viele Hinterlassenschaften von Weilern und Dörfern, die nicht mehr als 100 bis 200 Einwohner umfassten. Größere Ortschaften oder Städte lassen sich erst für das späte 3. Jahrtausend v. Chr. im Mittelmeerraum nachweisen. Sehr viel später entstanden in Mitteleuropa vereinzelt frühkeltische Städte, so genannte Oppida, wie die um 620 v. Chr. gegründete Heuneburg in Süddeutschland, die rund 5000 Einwohner zählte. Im vorderasiatischen Zweistromland sind städtische Entwicklungen bereits ab 3500 v. Chr. dokumentiert, zum Beispiel in Uruk im heutigen Irak. Dort ging die Urbanisierung jedoch mit weiteren Entwicklungen einher. Die Menschen erfanden eine Schrift, sie organisierten ihre Gesellschaft mit Hilfe einer Bürokratie, sie schufen einen



Durch geoarchäologische Prospektionen erfassten die Forscher die gesamte 6000 Jahre alte Siedlung von Maidanetske, die einst 200 Hektar groß war.

Staat mit einem oder mehreren Herrschern an der Spitze und damit auch soziale Ungleichheit.

All das gibt die Fundsituation in der Zentralukraine zwar nicht her, dafür sind die Erkenntnisse aber nicht weniger überraschend. Mit Hilfe der Luftbildarchäologie und geophysikalischen Prospektionsmethoden gelang es erstmals sowjetischen Forschern in den 1960er Jahren, große, ringförmige Siedlungen nachzuweisen. Anschließend ergaben Grabungen, die stilistische Analyse der Funde und C-14-Datierungen, dass die Fundorte in die mittlere Tripolje-Zeit einzuordnen sind, also in die Phase von 4100 bis 3600 v. Chr. Die Archäologen entdeckten überdies bemalte und filigran verzierte Keramik, die gemessen an den sonstigen Tonerzeugnissen im kupferzeitlichen Europa von auffällig hoher Qualität waren.

Die Funde elektrisierten die Archäologenwelt. Ebenso überraschten die verbrannten Reste von Häusern. Die sowjetischen Ausgräber taufte die ötornen Flächen »ploschchadki«, zu Deutsch »Plattformen«. Auf den Fußböden fanden sie alles so vor, wie es war, als Feuer die Bauten zerstört hatten; sie dokumentierten Objekte des täglichen und rituellen Lebens.

Die westliche Forschung staunte ungläubig angesichts der riesigen Ausmaße dieser frühen Siedlungen, die einfach nicht zu den bisherigen Kenntnissen über das Neolithikum und die Kupferzeit passen wollten. Doch spätestens seit den 1980er Jahren setzte sich auch im Westen mehr und mehr die Erkenntnis durch, dass vor mehr als 6000 Jahren in der Ukraine stadttähnliche Ortschaften existiert hatten.

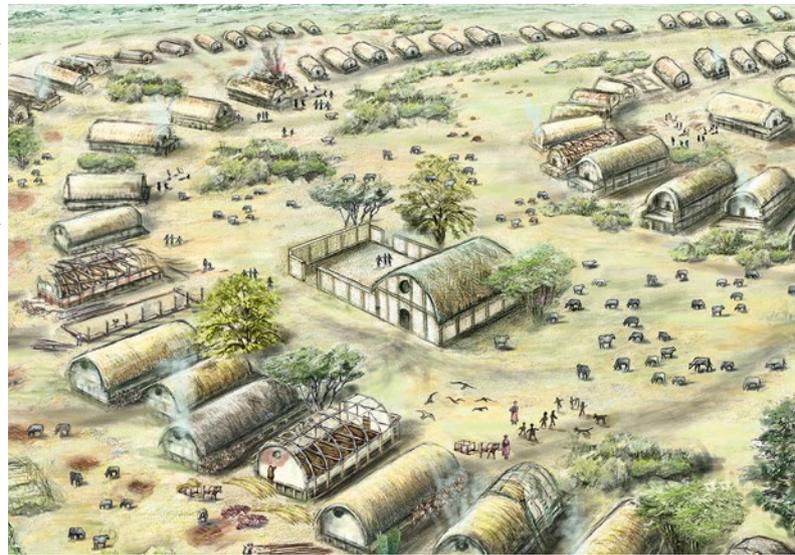
Wo sich heute Kultursteppe erstreckt, standen einst Wälder

In den letzten Jahren haben ukrainisch-europäische, oft interdisziplinäre Forschergruppen bedeutende neue Erkenntnisse zu diesen Fundorten gewonnen, vor allem mit Hilfe verbesserter Prospektions- und Grabungsmethoden. Auch wir an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel führten dort gemeinsam mit dem Deutschen Archäologischen Institut und den ukrainischen Kollegen geophysikalische Begehungen durch. Zudem haben wir innerhalb des Sonderforschungsbereichs »TransformationsDimensionen: Mensch-Umwelt-Wechselwirkungen in prähistorischen und archaischen Gesellschaften« der Deutschen Forschungsgemeinschaft ein mehrjähriges Feldprojekt begonnen, das wir zusammen mit ukrainischen und moldawischen Wissenschaftlern aus Kiew und Chişinău bestreiten. Im Kerngebiet der Großsiedlungen, dem ukrainischen Sinyukha-Becken an der Grenze zwischen Gras- und Waldsteppe, konnten wir die Entwicklung der kupferzeitlichen Besiedlung und der damaligen Umweltverhältnisse erfassen.

Heute erstreckt sich dort eine Kultursteppe. Die Landwirtschaft hat die Region geprägt, von der ursprünglichen Vegetation ist fast nichts mehr übrig. Großflächig werden

Wie die übrigen Häuser der Großsiedlung brannte auch dieses Gemeinschaftshaus ab. Gut zu erkennen sind die Reste des Baus (links) und die freie Hoffläche (rechts).

SUSANNE BEYER, INSTITUT FÜR UR- UND FRÜHGESCHICHTE, UNI KIEL



In jedem Viertel von Maidanetske stand ein größeres Gemeinschaftshaus (Bildmitte). Vermutlich trafen sich die Bewohner dort, um ihren Stadtteil zu verwalten.

Hartweizen, Soja, Sonnenblumen und Gemüse angebaut. Die Baumbestände beschränkten sich zumeist auf schmale Streifen, die Fahrwege zwischen den weiten Ackerflächen säumen. Doch vor rund 6000 Jahren lag das Gebiet der Tripolje-Großsiedlungen offenbar in einer Waldsteppe, deren Ausläufer bis in die nordöstlich gelegene mittellRussische Hochebene reichten. In der südlichen Ukraine erstreckte sich eine Grassteppe. Darauf deuten jedenfalls die wenigen Pollendiagramme hin, mit denen sich der damalige Bewuchs rekonstruieren lässt.

Zirka 45 Kilometer östlich der heutigen Stadt Uman, im Gebiet der einstigen Waldsteppe, liegen in unmittelbarer

INSTITUT FÜR UR- UND FRÜHGESCHICHTE, UNI KIEL





INSTITUT FÜR UR- UND FRÜHGESCHICHTE, LÜNEBURG

Was der Brand von den Wohnhäusern übrig ließ, gleicht einer tönernen Plattform. Daher rührt der Name »ploschchadki«, zu Deutsch: Plattform.

Nachbarschaft drei Megasites in einer flussreichen Region: Dobrovody, Taljanky und Maidanetske. Die letztgenannte Stätte untersuchen wir gemeinsam mit unserem Team seit 2012. Wir begannen unsere Forschungen mit geophysikalischen Prospektionen, gemeinsam mit dem Deutschen Archäologischen Institut. Die archäomagnetische Kartierung lieferte uns eine Gesamtansicht der Siedlung, so dass wir gezielt Wohnhäuser, Gruben, Gräben, Töpferöfen und große Hallen ausgraben konnten. Es wäre nämlich weder zeitlich noch finanziell machbar, alle Bauten frei zu legen. Auf zirka 200 Hektar wurden dort rund 3000 Häuser errichtet. Um dennoch die frühstädtische Entwicklung rekonstruieren zu können, haben wir an mehreren Stellen punktuelle Ausgrabungen durchgeführt und die Erkenntnisse dann auf die gesamte Stätte übertragen.

Das überraschende Ergebnis: Maidanetske war nach einem stadtplanerischen Konzept angelegt worden! Wie C-14-Datierungen ergaben, hatten die Siedler um 3990 v. Chr. die später bebaute Fläche vollständig gerodet und durch einen Graben begrenzt. Dieser sollte womöglich Schutz bieten, zusätzlichen Beistand erhofften sich die Erbauer aber wohl durch Votivgaben für die Götter – diverse Nahrungsmittel, die sie in der Umfriedung deponierten. Das Zentrum der Siedlung blieb unbebaut und bildete einen großen ovalen Platz. An dessen Rand installierten die Bewohner mehrere für damalige Verhältnisse hochtechnisierte Töpferöfen. Diese ließen sich über drei Kanäle anschüren, während die Keramik in einer separaten Kammer darüber gebrannt wurde. Von Beginn an errichteten die Bewohner spezielle Viertel – vermutlich um die eingefriedete Fläche systematisch aufzusiedeln. Die Erbauer legten

neun konzentrische Häuserringe an. Sie reihten dazu standardisierte, zirka fünf mal zwölf Meter große, meist zwei-stöckige Wohnbauten nebeneinander. Neben jedem Bau hob man Gruben zur Lehmgewinnung aus, in denen später der häusliche Abfall entsorgt wurde. Dass zahlreiche Häuser tatsächlich über mehr als ein Stockwerk – rund vier Meter – hoch auftrugen, legen die Grabungsergebnisse nahe. In den »ploschchadki« entdeckten wir eine Schichtabfolge aus verbranntem Lehm mit Abdrücken von Holzbohlen und Ästen, die sich nur damit erklären lässt, dass die Bauten über ein Obergeschoss verfügten. Das bezeugen auch tönernen Hausmodelle der Tripolje-Kultur: Sie stellen Gebäude dar mit einem Stockwerk über einem Untergeschoss, in dem vor allem Arbeitsgeräte lagerten.

Stadtverwaltung mit flacher Hierarchie

Aus der Vogelperspektive wirkt die Siedlung wie eine überdimensionierte Wagenburg. Die Stadtplaner hatten die neun Hausringe über radial angeordnete Wege mit dem zentralen Platz verbunden. Zwischen dem vierten und fünften Ring führten sie einen 100 Meter breiten Korridor rund um die Metropole. Wie beim Platz im Zentrum dürfte es sich dabei um einen bedeutsamen Bereich des öffentlichen Lebens gehandelt haben. Das legt überdies eine Reihe von auffälligen Bauten nahe, so genannte »mega-structures«: In dem Korridor errichteten die Bewohner in regelmäßigen Abständen eingefriedete Hallen. Wir gehen davon aus, dass sie als Gemeinschaftsorte dienten – als eine Art Klubhäuser, in denen sich die Bewohner eines Viertels versammelten, sich austauschten und gemeinsam Entscheidungen trafen. Darauf weisen nicht nur die Größe und Konstruktion hin, sondern auch die Fundverteilung im Inneren, die sich von den Wohnhäusern klar unterscheidet, zeigt dies. Von solchen Versammlungszentren aus, so

Ihren Abfall entsorgten die Stadtbewohner in Gruben neben den Häusern. Für die Archäologen bergen die »Mülltonnen« wertvolle Knochen- und Keramikfunde.



INSTITUT FÜR UR- UND FRÜHGESCHICHTE, LÜNEBURG



In den Großsiedlungen kamen häufig solche Tonmodelle ans Licht. Dieses Stück ist zirka zehn Zentimeter hoch und stellt einen von Ochsen gezogenen Schlitten dar.

unsere These, verwalteten sich die Stadtviertel selbst, die jeweils um die 150 Häuser umfasst haben dürften.

Im gesamten Siedlungsgebiet lokalisierten wir derartige Hallen. Sie sind jedoch nicht alle gleich dimensioniert, sondern lassen sich verschiedenen Größenklassen zuordnen. Vermutlich entsprachen diese bestimmten Verwaltungsebenen. Die Zentrale dürfte sich im größten Bau der Megasite befunden haben, der beim Haupteingang im Nordosten lag. Soziologen bezeichnen solche Versammlungshäuser als »integrative Architektur« und eine solche administrative Staffelung über mehrere Ebenen als »sequenzielle Entscheidungsstruktur«. Das heißt, die soziale und politische Organisation der Gemeinschaft manifestierte sich in den Bauformen.

2016 haben wir eine der »Mega-Strukturen« im Ringkorridor frei gelegt. Der Bau bestand einst aus einem rund 60 Quadratmeter großen überdachten Bereich mit einer Herdstelle sowie einem ummauerten Hof, der zirka 70 Quadratmeter Platz bot. Funde von Webgewichten, Spinnwirteln und Mühlsteinen deuten darauf hin, dass in dem Bereich Getreidekörner gemahlen und Textilien hergestellt wurden. An der Feuerstelle wurde Fleisch gebraten und verzehrt. Aus kulturanthropologischen Feldarbeiten kennen wir gute Parallelen für solche Gebäude. Ähnliche Versammlungshäuser sind zum Beispiel von den Naga im Nordosten Indiens bekannt. Die Angehörigen dieser Gruppe treffen sich in den so genannten Morungs, um Gespräche zu führen oder diversen gemeinschaftlichen Tätigkeiten nachzugehen.

Ebenfalls aus ethnologischen Studien wissen wir, wie Menschen in vorindustriellen, größeren Gesellschaften mit sozialen Spannungen umgehen: Sie kanalisieren Streit und Stress in rituellen Praktiken. Für derartige Handlungen haben wir in Maidanetske zahlreiche Nachweise dokumentiert – Altäre, an denen Tonfigurinen von Menschen oder Haustieren niedergelegt wurden, und Reste von bei Festen verzehrten Rindern, die man anschließend sorgfältig in Gruben deponiert hat.

Zwischen 3935 und 3700 v. Chr. war die Siedlung von Maidanetske am dichtesten bewohnt: In ungefähr 1700 Häusern lebten zirka 8500 Menschen, wenn wir pro Gebäude von einer fünfköpfigen Familie ausgehen. Wie sie lebten, brachten die Ausgrabungen der »ploschadki« ans Licht. Jeder Wohnbau war aufgeteilt in unterschiedliche Aktivitätszonen. Im Erdgeschoss lagerten Mahlsteine. Dort richtete man auch einen Unterstand für Tiere ein. Im ersten Stock gab es einen Vorraum, in dem Getreide verarbeitet wurde, ferner einen Hauptraum mit einem Kuppelofen zum Kochen, einen Essbereich mit einer tischartigen Feuerstelle und einen Schlafplatz. An der Längswand war zudem eine Bank installiert, auf der – vielleicht zu Repräsentationszwecken – bemalte Gefäße und Vorräte sichtbar aufbewahrt wurden.

Vor allem in den Abfallgruben fanden wir zahlreiche Tierknochen von Rindern, Schafen und Schweinen. Durch Isotopenanalysen an den Überresten fanden wir heraus, dass die Nutztiere nicht nur im Erdgeschoss der Wohnbauten gehalten wurden, sondern auch im Umfeld der Häuser und auf Allmenden in der näheren Umgebung. Das Verhältnis stabiler Isotopen in den Knochen verrät nämlich, ob ein Tier mit Getreide angefütert und über abgeerntete Felder getrieben wurde, ob es Abfälle in der Siedlung fraß oder ob es sich in einer Waldflur herumtrieb.

Ausgehend vom allgemein gültigen Prinzip – die zu bewirtschaftenden Anbauflächen mit dem geringstmöglichen Energieaufwand zu erreichen – lässt sich berechnen, wo die Äcker und Wälder rund um die Siedlung gelegen haben könnten. Dazu müssen die Bevölkerungsgröße, ihr Kalorienbedarf und die erzielten Felderträge bemessen werden. Hieraus ergibt sich, dass die Feldfluren vermutlich bis zu fünf Kilometer von der Siedlung entfernt lagen. Die Bauern mussten also teils weit hinausfahren, um Äcker zu bestellen und Ernten einzuholen. Dazu nutzten sie vermutlich Schlittengespanne. Von diesen Transportgefährten haben wir 30 kupferzeitliche Tonmodelle gefunden.

Welche Feldfrüchte die Bauern der Megasites kultivierten, ließ sich durch die Ausgrabungen klären. Verwertbare Reste von Getreide und Hülsenfrüchten haben sich zwar kaum erhalten, dennoch konnten wir zwei Arten von Spelzweizen nachweisen, Emmer und Einkorn, sowie Gerste. Darüber hinaus gibt es Funde von Erbsen. Für den Ackerbau bot der Boden hervorragende Bedingungen: Er war extrem stickstoffreich. Das wiederum gaben die Grabungen der »ploschchadki« preis. Die Menschen von Maidanetske hatten ihre Holzhäuser mit Lehm verputzt, den sie mit Druschresten vermischt hatten. Im beigemengten Stroh und in der Spreu isolierten wir Phytolithe. Dabei handelt es sich um silikatische Einlagerungen in Pflanzenzellen. Überdauerten die Reste in trockenen Bodenmilieus wie im Fall der Tripolje-Großsiedlungen, stehen die Chancen gut, dass die mikroskopisch kleinen Phytolithe erhalten bleiben. Neben den verschiedenen Getreidearten sind auch diverse

Bei den Grabungen traten zahlreiche Fragmente von Tongefäßen zu Tage. Typisch für die Tripolje-Kultur sind schwarz bemalte, kegelförmige Becher und Töpfe.

Beikräuter wie Vogelknöterich (*Polygonum aviculare*), Schwarzer Nachtschatten (*Solanum nigrum*) und vor allem Weißer Gänsefuß (*Chenopodium album*) durch Funde verkohlter Samen und Früchte nachgewiesen. Diese Zeigerpflanzen weisen darauf hin, dass die Anbauflächen sehr gut mit Nährstoffen versetzt waren.

Die Kornkammer der Kupferzeit

Überhaupt begünstigte die Bodenkonsistenz, genauer gesagt die fruchtbare Schwarzerde, den Anbau von Getreide. Mit Hilfe von Sediment-, Phytolith- und Pollenanalysen kamen wir dem Ursprung des besonderen Bodens auf die Spur. Er hatte sich zeitgleich mit der Großsiedlung von Maidanetske gebildet. Intensiver Ackerbau und Viehzucht hatten die Entstehung der Schwarzerde gefördert. Doch erst das Urbarmachen von Flächen sorgte dafür, dass sich auf dem dortigen Lössuntergrund eine Humusschicht aus pflanzlichen Überresten anreicherte.

Die bewaldeten Flächen lassen sich davon gut unterscheiden. Wie sedimentologische Untersuchungen im Randbereich von Maidanetske ergaben, wuchsen die Bäume auf Braunerdeböden – vermutlich standen umfangreiche Baumgruppen auf diesem Untergrund, die in der Waldsteppe verteilt waren. Wir wissen, dass im Umfeld der Megasite – wie für die Vegetationszone typisch – Eschen (*Fraxinus*), Eichen (*Quercus*) und Ulmen (*Ulmus*) wurzelten. Diesen Baumarten ließen sich jedenfalls die meisten Holzkohlefunde zuordnen. Offenbar bildeten sie die wichtigste Ressource für den Hausbau und als Feuerholz. Und das im Überfluss: Berechnungen zur Rekonstruktion der einstigen Landschaft ergaben, dass die Menschen von Maidanetske stets ausreichend Holz schlagen konnten. Das heißt, solange die Siedlung bestand, existierten genügend große Waldinseln im Umfeld der Metropole.





Vom Aufriss der Wohnbauten ist nahezu nichts erhalten geblieben. Tonmodelle aus den Megasites verraten jedoch Details der Architektur wie die runden Dächer.

Die bäuerliche Bevölkerung sorgte mit dem Holzeinschlag aber auch für eine Ausbreitung der Grassteppe. Bei den Grabungen bargen wir häufig Teile von gedrehten Grannen, das sind pflanzliche Borsten im Fruchtstand von Gräsern. Sie bleiben leicht im Fell von Tieren hängen oder werden vom Wind in Form von Grannenbällen fortgetragen. So verbreiten sich die Grasfrüchte über weite Strecken. Die Grannen aus den Grabungen stammen von Federgräsern (*Stipa*), die zu den typischen Steppenpflanzen gehören. Möglicherweise lag Maidanetske also zunächst in einer Waldinsel, die zur Gewinnung von Nutzholz gerodet wurde. In die lichten Flächen wehte die *Stipa*-Saat ein, und in der Folge breitete sich die Grassteppe aus. Die Tierhaltung dürfte diese Entwicklung gefördert haben. So könnten etwa Schafe die Saat der Federgräser im Fell verschleppt haben.

Ohne die landwirtschaftlichen Spitzenbedingungen wären die Tripolje-Metropolen und ihre Gesellschaften wohl nicht lebensfähig gewesen. Um möglichst ertragreich zu wirtschaften, wurden die Äcker intensiv bestellt. Das heißt, die Tripolje-Bauern gruben die Felder mit hohem Arbeitsaufwand um und jäteten regelmäßig Unkraut. Das belegen unsere archäobotanischen Analysen. Wir haben sehr viele Unkräuter nachgewiesen, die im Sommer wuchern, und keine, die länger übers Jahr stehen. Wäre dies der Fall, wären die Felder wohl extensiv, also weniger aufwändig bewirtschaftet worden.

Die Menschen von Maidanetske lagerten und verarbeiteten das Getreide in ihren Häusern, zum Teil auch in den Gemeinschaftshallen. Sie speicherten Emmer und Einkorn nach dem Dreschen als Ährchen, die Gerste in kompletten Ähren, also im vollen Fruchtstand. Das

Aufbewahren der bespelzten Körner schützte sie vor Pilzbefall. Die Menschen droschen die Gerste offenbar erst, wenn es ans Essen ging. Und was die Bewohner aßen, lässt sich gut nachvollziehen: Im Hausareal entspelzten sie Emmer, Einkorn oder Gerste – sie entfernten also die Schale, um ans nackte Korn zu gelangen – und kochten das Getreide mit Hülsenfrüchten wie Erbsen und Linsen ein.

Hinweise auf soziale Unterschiede gibt es bisher keine. Zwar sind die Wohnhäuser nicht alle exakt gleich groß. Außerdem scheinen sich manche Haushalte auf bestimmte Tätigkeiten spezialisiert zu haben – einige Bewohner webten vor allem Textilien, andere mahlten vornehmlich Getreide –, doch in viel mehr unterschieden sie sich nicht. Allerdings kommt hinzu: Von der Tripolje-Kultur sind fast keine Gräber dokumentiert. Wir wissen also nicht, wie und wo die Toten bestattet wurden.

Damit fehlt auch eine wichtige archäologische Quelle, aus der sich sonst ablesen lässt, wie eine Gesellschaft strukturiert war. Ohne Skelettfunde lassen sich zudem keine Daten über das genetische Erbe der Tripolje-Menschen gewinnen, wie sie für zahlreiche prähistorische Kulturen vorliegen. Einzig in der Republik Moldau werteten wir die Skelettreste von vier Frauen aus der Zeit zwischen 3500 und 3100 v. Chr. aus, also aus der Phase nach der Tripolje-Blüte. Die daraus gewonnene DNA bezeugt: Die Menschen waren extrem mobil. Zum einen führt die Gensignatur der vier Frauen zu den ersten neolithischen Bauernkulturen in Mitteleuropa, den Angehörigen der Linearbandkeramik, zum anderen finden sich Anteile, die auf einheimische Wildbeuter sowie Bevölkerungsgruppen aus der eurasischen Steppe zurückgehen. Letzterer Genfluss ist für Mitteleuropa viel später bezeugt – erst um 2800 v. Chr. zeigt er sich bei den so genannten Schnurkeramikern, die mitunter aus den Jamnaja-Viehhirten hervorgingen. Hingegen zogen in die Tripolje-Region im 4. Jahrtausend v. Chr. zunächst bäuerliche Gruppen aus dem Westen und Steppenbevölkerung aus dem Osten.

Etwas mehr als drei Zentimeter groß sind diese fragmentierten Tonfiguren. Links die Darstellung eines Widders, rechts der Torso einer Art Puppe. Bewegliche Beine und Arme waren über die Löcher befestigt.



Die Angehörigen der späten Tripolje waren demnach die Nachkommen von diversen Einwanderern. Wie es scheint, waren im Sinyukha-Becken Menschen unterschiedlicher kultureller Herkunft zusammengetroffen, die sich offensichtlich gemeinsam eine neue und andersartige Lebensweise und Weltanschauung geschaffen haben: ein großstädtisches Dasein in den Megasites.

Ein Ballungsraum bricht zusammen

Doch ein Rätsel ist bisher ungelöst: Bereits um 3650 v. Chr., nach nur etwas mehr als zehn Generationen, haben die Menschen von Maidanetske die Großsiedlung verlassen. Über 1700 Häuser wurden zum selben Zeitpunkt systematisch niedergebrannt – Hinweise auf »Brandstifter« von außen fehlen. Die genannten Hirtennomaden der Jamnaja-Gruppen zogen erst zirka 350 Jahre später in die Zentralukraine, wo sie zahlreiche Grabhügel, die so genannten Kurgane, hinterlassen haben. Als etwaige Eroberer der Tripolje-Städte kommen sie nicht in Frage.

Was immer in Maidanetske geschehen war, es widerfuhr auch den 14 übrigen Großsiedlungen im Umfeld. Sie existierten ähnlich kurz, wobei einige schon ab 4100 v. Chr. errichtet, dann aber früher aufgegeben wurden. Viele der Metropolen blühten gleichzeitig. Im Umfeld von 15 Kilometern bestanden neben Maidanetske noch das 320 Hektar große und 2200 Häuser umfassende Taljanky sowie Dobrovody. Dieser Ort erstreckte sich auf einer Fläche von 210 Hektar, auf der sich 1380 Wohnbauten aneinanderreichten. Daraus folgt: In einem Gebiet von zirka 60 Quadratkilometern herrschte um 3700 v. Chr. eine Bevölkerungsdichte von rund 500 Einwohnern pro Quadratkilometer, ausgehend von fünf Bewohnern pro Haus – ein regelrechter Ballungsraum.

Unsere archäologischen Untersuchungen lieferten auch Hinweise darauf, wie die Menschen vor der Großstadtzeit lebten. Etwa ab 4100 v. Chr. kamen Gruppen in das Sinyukha-Becken, die sich in Großsiedlungen zusammenschlossen. Die Gründe dafür sind unklar. Dass sie Siedlungen dieser neuartigen Größenordnung überhaupt verwalten konnten, verdankten die Tripolje-Siedler unter anderem technologischen Innovationen wie dem von Tiergespannen gezogenen Lastschlitten. Dadurch mussten die Waldsteppenbewohner deutlich weniger Energie für ihre tägliche Arbeit aufbringen; größere Wegstrecken ließen sich zeit- und energieeffizient zurücklegen. Das heißt, erst mit den Schlitten, die Sommer wie Winter fahrtüchtig waren, konnte sich die Bevölkerung dauerhaft in große Siedlungen zusammenfinden und zugleich die Feldfluren im weiteren Umland bewirtschaften.

Was uns bei der Analyse der Grabungsdaten allerdings überraschte: Trotz der für prähistorische Verhältnisse extrem hohen Bevölkerungsdichte wurde die ökologische Tragfähigkeit der Region nie erschöpft. Weder die Bodengüte noch der Waldbestand verringerten sich in kritischem Maß. Damit war offenbar die Ernährung der Bevölkerung stets gesichert und genügend Holz für den Hausbau sowie den Betrieb der Feuerstellen und Töpferöfen vorhanden. Womöglich nutzten die Tripolje-Bewohner die üppigen Holzreserven zudem für Bestattungen. Gut möglich, dass man die Toten an noch unbekanntenen Orten verbrannte,

anschließend die Überreste vergrub oder verstreute. Unsere Erkenntnisse machen jedoch klar: Der kupferzeitliche Ballungsraum in der Zentralukraine brach nicht etwa zusammen, weil Ressourcenknappheit herrschte. Auch für ausgedehnte Dürreperioden gibt es keine Hinweise. Ebenso wenig lässt sich bisher die von Forscherkollegen vertretene These belegen, die Pest hätte grassiert. Ihnen zufolge sei der Erreger *Yersinia pestis* von den in den Häusern gehaltenen Tieren auf den Menschen überggesprungen. Das Bakterium ließ sich aber bislang an den wenigen bekannten Skelettresten in der Region für diese Zeit nicht nachweisen.

Das Ende der Tripolje-Metropolen muss also einen anderen Grund gehabt haben. Und wir hegen eine begründete Vermutung. Für die Anfangszeit dokumentierten wir mehrere, unterschiedlich große Gemeinschaftshäuser in Maidanetske. Am Ende war nur noch das größte Gemeinschaftshaus in Gebrauch. Anscheinend verloren die unteren und mittleren Ebenen irgendwann ihre Funktion. Damit beraubten sich die Siedler aber auch der Möglichkeit, Vorhaben und Entscheidungen in einem mehrstufigen Prozess zu kommunizieren. Möglicherweise kam es zu erheblichen Managementproblemen, die schließlich zum Zusammenbruch der Großsiedlung führten. Von ethnologischen Studien wissen wir, dass die Entscheidungsfindung in den Versammlungshäusern egalitärer Gesellschaften zwar nicht immer zielführend verlief, dennoch sind derartige »demokratische« oder nicht hierarchische Strukturen extrem leistungsfähig. Die Tripolje-Kultur jedenfalls kollabierte erst in dem Moment, als das »sequenzielle« System zu Gunsten eines zentralen Verwaltungs- oder Herrschaftsorgans aufgegeben wurde.

In der Folge verstreuten sich die Menschen und siedelten wieder in kleineren Dörfern und schließlich in kleinsten Weilern statt in frühstädtischen Verhältnissen. Diese Entwicklung lässt sich unter anderem an der materiellen Kultur nachvollziehen. Die Objekte des täglichen Lebens waren um 3700 v. Chr. im gesamten Tripolje-Gebiet – einer Region von 400 000 Quadratkilometern – recht einheitlich gefertigt. Um 3500 v. Chr. war dies nicht mehr der Fall. Es hatten sich zahlreiche regionale Keramikstile herausgebildet, was eine Folge des selteneren Austauschs gewesen sein dürfte. Später, um 3200 v. Chr., zogen dann die Viehhalter der Jamnaja-Kultur in das Gebiet – eine neue Epoche begann. ◀

QUELLEN

Dal Corso, M. et al.: Modelling landscape transformation at the Chalcolithic Tripolye mega-site of Maidanetske (Ukraine): Wood demand and availability. *The Holocene* 29, 2019

Hofmann, R. et al.: Governing Tripolye: Integrative architecture in Tripolye settlements. *PLOS One* 14, 2019

Immel, A. et al.: Gene-flow from steppe individuals into Cucuteni-Trypillia associated populations indicates longstanding contacts and gradual admixture. *Scientific Reports* 10, 2020

Müller, J. et al. (Hg.): Trypillia mega-sites and European prehistory: 4100–3400 BCE. Routledge, 2016

Müller, J. et al.: Maidanetske 2013. New excavations at a Trypillia megasite. *Studien zur Archäologie in Ostmitteleuropa* 16. Habelt, 2017

Ohlrau, R.: Maidanets'ke. Development and decline of a Trypillian mega-site in Central Ukraine. Sidestone Press, 2020



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

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 2.900 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

Renommierte europäische Wissenschaftsorganisationen nominieren Wissenschaftlerinnen für **AcademiaNet**

www.academia-net.org

Folgen Sie uns:



Ein Projekt von

REZENSIONEN

TIERFOTOGRAFIE SCHICKSALHAFTE GEMEINSCHAFT

Ohne Labormäuse ginge in der Forschung nichts. Dieser Bildband würdigt die Tiere.

► Eigentlich müsste die Labormaus Menschenmaus heißen, finden die Fotografen Heidi und Hans-Jürgen Koch. Denn so unterschiedlich unsere Spezies auch aussehen mögen: Biologisch sind wir uns sehr ähnlich. 95 Prozent der Gene, die eine Maus trägt, besitzen wir in ähnlicher Form. Viele Krankheiten haben bei beiden Arten dieselbe genetische Ursache.

Der Mensch habe sein Schicksal an das der Maus gekoppelt, heißt es im Vorspann des Buchs. Das klingt im ersten Moment etwas übertrieben, ist im Kern aber richtig. Denn die medizinische Forschung konzentriert sich zu einem großen Teil auf die Nager. Für fast jede Humankrankheit gibt es heute ein Mausmodell. Erst wenn ein potenzielles Medikament beim Tier die gewünschte Wirkung zeigt, wird es an Menschen getestet.

Auf zwei Seiten präsentieren die studierte Sozialarbeiterin und der Verhaltensforscher die Geschichte – oder, wie sie es nennen, die »steile Karriere« – der Labormaus. Im restlichen Teil des Werks lassen sie Bilder sprechen. Das Autorenpaar, das in seiner mehr als 25-jährigen, gemeinsamen Fotografienkarriere schon zahlreiche Preise und Auszeichnungen gewonnen hat, will den Mäusen ihre »Individualität und Persönlichkeit« zurückgeben. Denn die Nager, mit denen Forscher arbeiten, sind genetisch weitgehend identisch: »Tagtäglich werden Legionen von Labormäusen als eine anonyme Masse Tiermaterial produziert und verbraucht«, schreiben die Kochs. Damit appellieren sie auch an die Moral und Ethik der Wissenschaft.

Im Vordergrund stehen aber ganz klar die Tiere selbst. Heidi und Hans-Jürgen Koch stellen die »Stars der Labormäuse« vor, sprich die meistverwendeten Stämme. Sie nehmen ungewohnte Perspektiven ein, begegnen

Heidi & Hans-Jürgen Koch
THANK YOU, MOUSE!
Edition Lammerhuber, Baden
2020
96 S., € 39,90



nen den Mäusen auf Augenhöhe, kommen ihnen sehr nahe und bleiben doch auf respektvoller Distanz. Das Spiel mit Licht und Schatten unterstützt diesen Eindruck: Die Tiere sitzen oft vor einem dunklen Hintergrund oder sind nicht vollständig ausgeleuchtet.

Manche Bilder zeigen nur bestimmte Körperteile in starker Vergrößerung, etwa ein Ohr mit all seinen feinen Äderchen. Dennoch tun die Kochs es nicht den Forschern gleich, die sich häufig auf winzige Details konzentrieren und darüber das restliche Tier vergessen. Die Autoren setzen die Tiere in all ihren Facetten in Szene: kraftvoll im Sprung, neugierig schnüffelnd, als soziale Wesen, inmitten einer Gruppe, beinahe menschlich – und manchmal ganz verletzlich und filigran. Die Bilder von nackten, fast durchsichtigen Neugeborenen gehen manchem Betrachter sicherlich unter die Haut. Blind und völlig hilflos liegen sie da, allein oder auf einem Haufen, sind von der Gunst der Wissenschaftler abhän-

Für fast jede Krankheit des Menschen gibt es ein künstlich gezüchtetes Mausmodell, das dazu dient, die Krankheitsmechanismen zu erforschen.

gig. Nicht nur wir haben unser Schicksal an die Maus gekoppelt – ihres ist auch fest mit unserem verbandelt. Nur dass die Nager nie eine Wahl hatten. Wer sich auf das Buch einlässt, dem eröffnet es einen neuen Blickwinkel auf die Beziehung zwischen Menschen und Mäusen. In jedem Fall regen die Fotos zum Nachdenken an.

Die Rezensentin Annika Röcker ist promovierte Biochemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Ulm.



GESELLSCHAFT MEHR UNGLEICHHEIT, MEHR WIDERSPRÜCHE

Wissenschaftler(innen) aus diversen Bereichen hinterfragen, wie sich Covid-19 soziologisch auswirkt. Ihre Antwort: eher nicht gut.

Die Coronakrise ist viel mehr als eine Pandemie. Sie ist darüber hinaus ein kultursoziologisches Phänomen. Unser Umgang mit ihr polarisiert, stigmatisiert und verstört. Verändert sie die Gesellschaft auf fundamentale Art und Weise, oder fokussiert sie wie ein Brennglas bereits bestehende Probleme und Strukturen? Das versuchen die Autor(inn)en dieses Sammelbands, die aus Geistes- und Sozialwissenschaften, Biologie und Ökonomie kommen, zu klären. Ihre Antwort: Die Pandemie als Krisensituation führt zu einer Verschärfung von Ungerechtigkeit und Ungleichheit. War Popstar Madonna noch der Meinung, dass im Angesicht des Virus alle gleich seien, breitete sich die Pandemie in Ländern wie Indien, Brasilien und den USA besonders unter den Armen und sozial schlecht Gestellten rasant und fatal aus. Bürgern westlicher Wohlstandsgesellschaften müsste dies deutlich klarmachen, dass es eine Gleichheit nicht gibt, nicht einmal innerhalb westlicher Gesellschaften. Wer im Homeoffice sitzt, den trifft die Krise anders als Menschen in Alten- und Pflegeheimen oder solche, die an der Kasse im Supermarkt arbeiten.

Der Band ordnet die Pandemie auf mehreren Ebenen ein. Zum einen im historischen Vergleich, denn auch in Zeiten der Pest gab es die krudesten

Verschwörungstheorien, und trotz geringen Wissens über die Verbreitungswege zeigte der Einsatz von Masken und Quarantäne schon damals Wirkung. Zum anderen soziologisch, indem die Autor(inn)en die Arbeitsverhältnisse oder den wachsenden, tief verwurzelten Rassismus unter die Lupe nehmen. Weiterhin bioökonomisch, indem die Beiträge aufzeigen, warum Habitats erhalten werden müssen, damit wir Viren im Griff behalten. Auf diese Weise ordnet der Band das Phänomen reflektiert und unaufgeregt in bestehendes Wissen ein. Einig sind sich die Autoren darin, dass unsere moderne Welt auf Strukturen der Ausbeutung basiert, die sich durch die Coronakrise verschärfen. Es ist unsere Krise, deshalb gehört dieser Diskurs in die Gesellschaft, um über Hintergründe, Strukturen und Mecha-

Die Krise zeigt: Es gibt keine Gleichheit

nismen aufzuklären. Was zu der einzigen Kritik an dem Band führt: Wegen des fachnahen Stils ist er nur hinreichend Vorgebildeten zugänglich.

Obwohl wir noch mittendrin stecken, wird bereits klar, dass die Pandemie Widersprüche schürt. Während die europäischen Grenzen im Schengen-Raum wieder geschlossen wurden, hängen »Leave no one behind«-Plakate in den Fenstern. Und nachdem man der Verkäuferin abstands- und anstandslos das letzte Toilettenpapier entrissen hat, beteiligt man sich am emotionsgeladenen Applaus für die Systemrelevanten. So löst der Band sein Versprechen ein, auf verschiedenen Ebenen zu beschreiben, wie Gesellschaften in der Pandemie agieren. Das Buch verlangt nach fortgesetzter Beobachtung und Dokumentation, was der Verlag mit dem Blog »Jenseits von Corona« fördert.

Die Rezensentin Elisabeth Stachura ist promovierte Soziologin und Wissenschaftsjournalistin in Bremen.

TECHNIKPHILOSOPHIE MENSCH UND KI

Was bedeutet Menschsein in Zeiten der Computeralgorithmen?

»Die KI-Forschung selbst kümmert sich nicht um die philosophische Grundlagenarbeit, sondern sucht ihr Heil in der Erprobung evolutionärer Algorithmen und neuronaler Netze«, konstatiert der jüngst emeritierte Professor für Technikphilosophie Bernhard Irrgang in diesem Buch. In dem Werk versucht er eine »evolutionär-phänomenologische Leib-Anthropologie« zu entwickeln, wie es etwas sperrig im Untertitel heißt. Das klingt zunächst wie ein fachphilosophischer Theorieentwurf, entpuppt sich bei der Lektüre aber schnell als ein Set durchaus anwendungsbezogener Fragen: Wie verhalten sich die Natur und die Technik der künstlichen Intelligenz (KI) zueinander? Welche Rolle spielt das philosophische und kognitionspsychologische Konzept des Bewusstseins, wenn man es ohne biologischen Körper betrachtet? Stellen Roboter eine Ersatzkörperlichkeit zur Verfügung, in die sich Intelligenz und Bewusstsein »einbetten« lassen? Wie sieht die Zukunft einer Gesellschaft aus, in der künstliche Intelligenz das Leben mitbestimmt?

Irrgang hat sich über seine gesamte Karriere hinweg mit technikphilosophischen Fragen beschäftigt. Das wird bereits am Literaturverzeichnis des Buchs deutlich, in dem des Autors eigene Beiträge nicht weniger als vier von insgesamt zwölf Seiten belegen. Da verwundert es kaum, dass Irrgang in seinem Werk eine riesige Themenfülle abhandelt – und noch dazu zwei Folgebände plant.

Vielleicht auch deshalb bleibt der Text stark thesenhaft und wirkt wie eine Sammlung von Denkansätzen, die nicht selten zwischen verschiedenen Themen hin und her springen. Dabei steht jedoch durchweg eine »Haupthandlung« im Vordergrund: Über drei Jahrtausende hinweg haben Philosophen mit ihren diversen Spezialisierungen (philosophische Anthropologie, Ethik, Technikphilosophie, Erkenntnistheorie und so weiter) ein Bild entworfen, das den Menschen als *animal rationale*, also als »denkendes



Tier« auffasst, welches sich seiner selbst bewusst ist und sein Denken theoretisieren und als Subjekt reflektieren kann. Mit dem Aufkommen von Maschinen und schließlich Computern mit KI steht dieses Welt- und Selbstverständnis nun auf der Probe: Kann es etwas Nichtmenschliches geben, dem derselbe Status zuerkannt werden muss wie dem Menschen?

Die Technologie der KI, die von Beginn an zentral an menschlichen Kategorien ausgerichtet war, scheint sich im Lauf ihrer Entwicklung auf die »conditio humana« zuzubewegen. Wissenschaftler entwickelten beispielsweise Perzeptronen, technisch realisierte neuronale Strukturen; oder eine Kognitionswissenschaft, die mit Hilfe von KI das menschliche Erkennungsvermögen verstehen will; oder auch eine KI-Forschung, die Sprache technisch analysier- und synthetisierbar machen soll – etwas, das bis dahin als rein menschliches Vermögen

Bernhard Irrgang
**ROBOTER-
BEWUSSTSEIN,
AUTOMATISIER-
TES ENTSCHEIDEN
UND TRANS-
HUMANISMUS**

Anthropophisierungen von KI im Licht evolutionär-phänomenologischer Leib-Anthropologie
Königshausen & Neumann,
Würzburg 2020
322 S., € 68,-



angesehen wurde. Zugleich bewegt sich der Mensch auf die Technik zu, etwa indem KI einen »technokratischen Traum von der Berechenbarkeit menschlicher Kompetenzen« suggeriert, wie Irrgang schreibt. Wird diese Annäherung von Technik und Mensch zu einer Symbiose führen, wie sie im Begriff des Transhumanismus definiert ist? Irrgang verneint dies vielfach und

anhand zahlreicher Beispiele als dogmatische Weltanschauung, denn die Menschwerdung habe als Evolution stattgefunden, während der sich Körper und Geist gemeinsam und aneinander entwickelten. Die Unterschiede zwischen Technik und Natur, meint er, blieben kategorial – sogar dann, wenn Technik selbst körperlich wird, etwa in Form der Robotik. Vermenschlichende Metaphern (»Denkmaschine«, »neuro-nal«, »learning«) könnten diese Differenz allenfalls sprachlich verschleiern.

Vieles von dem, worüber Irrgang schreibt, ist Zukunftsmusik. Allerdings entwickelt er seine Thesen nicht im luftleeren Raum der Sciencefiction – auch wenn er gelegentlich Asimov, Clarke oder »Matrix« in seine Argumentation einbezieht. Denn zum Auftrag der Technikphilosophie gehört eine Technikfolgenabschätzung auf Basis bestehender Technologien und Konzepte. Hier kommt der Philosophie eine nicht unwichtige Rolle in der Hypermoderne

Die Spektrum eLearningFlat



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

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

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

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



zu, wie Irrgang die durch Computertechnik bestimmte Gegenwart nennt: Sie liefert Analysen und Prognosen, die das scheinbar wert- und ideologiefreie Tun der Techniker einschätzt. Damit leisten Bücher wie das vorliegende einen wichtigen Beitrag zur Überwindung des »Zwei-Kulturen«-Problems, dem zufolge sich Geistes- und Kulturwissenschaften einerseits und Natur- und Technikwissenschaften andererseits nichts zu sagen hätten, weil ihre Methoden und Gegenstände zu unterschiedlich seien. Gerade dann jedoch, wenn Technikwissenschaften ontologische, anthropologische oder ethische Fragen aufwerfen oder wenn Geisteswissenschaften mittels Technik betrieben werden, erscheint ein Dialog zwischen beiden Sphären zwingend erforderlich.

Irrgangs Buch ist dazu jedoch sicherlich kein geeigneter Ausgangspunkt, weil es tief auf Vorwissen um philosophische Fachdiskurse der vergangenen Jahrhunderte zurückgreift. Der Autor versucht zwar, die betreffenden Argumentationen nah an den Quellen zu dokumentieren, das muss aber sporadisch bleiben, um nicht zu stark vom eigentlichen Thema wegzuführen. Auf Laien dürfte sein Buch fast wie ein überlanger Essay wirken. Vieles darin ist und bleibt These, wiederholt sich, widerspricht sich zuweilen sogar; und auch einige Allgemeinplätze verkneift sich der Autor nicht (»Lithium, Neurotransmitter und Antidepressiva haben das Selbstwertgefühl der Amerikaner erhöht«). Zudem leidet der Text vielfach unter Druckfehlern; ein Lektorat hat offenbar nur sporadisch stattgefunden. Kurzum: Das Buch gibt sicherlich einen guten, wenn auch sehr spezifischen Einblick in die philosophische Debatte zur KI, kann aber als Einstieg dafür kaum empfohlen werden. Inwiefern die beiden Folgebände zur »Rationalisierung der Lebenswelt« und zur »Transformation der Geistes- und Kulturwissenschaften« ausfallen werden, bleibt abzuwarten.

Der Rezensent Stefan Höltgen ist promovierter Medienwissenschaftler und Informatiker. Er lebt und arbeitet in Berlin als Dozent, Publizist und Computerarchäologe.

GESCHICHTE ÜBERDEHNTEN MACHT

Im Reich Karls V. ging die Sonne niemals unter. Dennoch – oder deshalb – scheiterte der Kaiser.

▶ Als König von Spanien, Herzog von Burgund, Erzherzog von Österreich (bis 1522) und Kaiser des Heiligen Römischen Reichs (1519–1556) gebot der Habsburger Karl V. über ein weltumspannendes Imperium, in dem die Sonne nie unterging. Es nach seinem Willen zu formen, war diesem Global Player jedoch nicht vergönnt. So lautet die Quintessenz des vorliegenden Buchs. Karl Schilling, emeritierter Professor für Europäische Geschichte der frühen Neuzeit an der Humboldt-Universität zu Berlin, beschreibt Karl darin als eine heroische und zugleich tragische Herrschergestalt, die »vor den Fliehkräften der Zeit kapitulieren musste«.

Stärker als bislang in der Forschung praktiziert, versucht Schilling, Karls Handeln aus dessen Persönlichkeit heraus zu ergründen. Der Autor schildert den Kaiser als verschlossenen, tief im katholischen Glauben verwurzelten und von hohen christlichen Moralvorstellungen geleiteten Monarchen. Seine kirchentreue Lebensführung als Ehemann, die ritterliche Behandlung seiner Gegner (freies Geleit Luthers nach dem Reichstag von Worms 1521) und das Verbot, Indigene in den amerikanischen Kolonien zu versklaven, seien Ausdruck dieser wertebasierten Haltung gewesen, so Schilling.

Gleichzeitig skizziert der Autor die Zeitumstände, die Leben und Wirken

des Habsburgers maßgeblich prägten. Karls Sozialisation im kulturell reichen Burgund am Hof seiner Tante Margarete von Österreich wird ebenso tiefgründig ausgeleuchtet wie die Auswirkungen bahnbrechender Erfindungen (Buchdruck), theologischer Umwälzungen (Reformation) und außereuropäischer Entdeckungen. So war Karl V. mit vielen Problemen auf einmal konfrontiert. Dazu gehörten die aufreibenden politischen Auseinandersetzungen im Reich und in den iberischen Königreichen Kastilien und Aragon, der wieder aufgeflammete Konflikt mit dem Papst um eine weltliche beziehungsweise geistliche Zentralgewalt, die Bedrohung der Christenheit durch die immer weiter expandierenden Osmanen, der Dauerkonflikt mit Frankreich um die europäische Vorherrschaft und die konfessionelle Auseinandersetzung mit der Reformation.

Karl musste an vielen Fronten zugleich kämpfen

Verschärft wurden all diese Konflikte durch Karls ideologisch-politische Herrschaftskonzeption der »monarchia universalis«, die sich mit der Vorstellung eines Abendlands katholischer Prägung verband, das unter Karls Führung stehen sollte. Schilling legt überzeugend dar, dass dieser Anspruch den politischen Ordnungsvorstellungen der Zeit widersprach. Weder die übrigen gekrönten Häupter Europas noch die ständischen Partikulargewalten im Heiligen Römischen Reich seien gewillt gewesen, sich einem Universalherrscher bedingungslos unterzuordnen. Statt sein Reich zu befrieden, so Schilling, versetzte Karl es am Ende in Aufruhr, indem er durch unbedingten Absolutheitsanspruch dazu beitrug, dass sich die ständische und konfessionelle Opposition im Reich solidarisierten und die



Interessen äußerer Gegner konvergierten (etwa in Form der »unheiligen Allianz« zwischen Franz I. und Süleyman). Hinzu kam, dass dem Kaiser eine kohärente Strategie fehlte; dass er gleich an mehreren Fronten parallel kämpfen musste; und dass die Bruchlinien zwischen den verschiedenen Teilen der habsburgischen Besitzungen, die mangels eines einheitlichen Machtapparats zu Tage traten, zu einer Überdehnung der Kräfte führten.

Schilling hat eine erfrischend lebendige, tiefgründige und lesenswerte Darstellung über Karl V. vorgelegt. Demnach lag die Tragik des Kaisers darin, dass »zwischen präntendierter Macht und erbrachter Herrscherleistung« eine große Lücke klaffte. Als Wahrer der christlichen Einheit und des Friedens angetreten, musste Karl schließlich einsehen, dass er mit seinem Konzept einer Universalmonarchie und einer modernisierten, aber

geeinten Kirche gescheitert war. Und zwar sowohl gegenüber den Reichsfürsten, die sich keinen Zentralstaat aufzwingen lassen wollten; als auch gegenüber der Reformation, die die Einheit der Kirche zerstörte; sowie gegenüber Frankreich, das auch weiterhin gegen Karls Universalanspruch aufbegehrte; und nicht zuletzt gegenüber den Osmanen, deren Expansionsdrang sich nicht eindämmen ließ.

Der Rezensent Theodor Kissel ist Historiker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist. Er lebt im Raum Mainz.

BIOLOGIE DARWIN'S VERMÄCHTNIS

Die heute gängige Synthetische Evolutionstheorie müsse umfassend erweitert werden, schreibt der Biologe Axel Lange.

Die Frage im Untertitel des Buchs (»Ist Darwin überholt?«) soll wahrscheinlich Interesse wecken. Sie wirkt allerdings etwas merkwürdig. Nein, natürlich ist Darwin nicht überholt, denn die Evolution ist eine Tatsache und die zentrale Aussage der darwinischen Theorie wurde zigfach bestätigt: Arten ändern ab, weil ihre Individuen erbliche Merkmale haben und Veränderungen dieser Merkmale an ihre Nachkommen weitergeben, wobei die natürliche Selektion jene bevorzugt, die besser an ihre Umwelt angepasst sind. Ja, Darwin ist insofern überholt, als seine Theorie 160 Jahre alt ist und bis heute vielfach erweitert wurde; es wäre geradezu bizarr, würde sie noch unverändert gelten.

Der Biologe Axel Lange, Autor des Buchs, schreibt eingangs, Darwins Theorie habe zwei große Lücken gehabt: Sie habe nicht beantwortet, wie die Vererbung erfolge und woher die Variation der erblichen Merkmale

Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile als Abonnent

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

► **Kostenfreie Exkursionen und Begegnungen**

20.11.2020: Online-Exkursion »Besichtigung des Weltraumbeobachtungsradars TIRA«, digital

► **Eigene Veranstaltungen und ausgewählte Veranstaltungen von Partnern zum Vorteilspreis**

30.01.2021: **Spektrum-LIVE**-Veranstaltung »Space Simulator, B777 & Flugkapitän C. Frick«, Zürich

► **Digitales Produkt zum kostenlosen Download und weitere Vorteile**

Download des Monats im November: **Gehirn&Geist** Dossier 4/2019 »Hirnforschung«
Reduzierte Digitalpakete »Supernovae«, »Sinne« sowie »Liebe, Glück und Freundschaft«
Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

► **Verlosungen von Büchern und Spektrum-Magazinen**

Weitere Informationen und Anmeldung:

Spektrum.de/plus

komme. Eigenartigerweise lässt er dort unerwähnt, dass Darwin das gar nicht wissen *konnte* – der Nachweis, dass die Erbinformation über DNA weitergegeben wird, erfolgte mehr als 80 Jahre nach Erscheinen der darwinschen Theorie. Das erstaunt umso mehr, da Lange wenige Seiten später selbst erörtert, wie mühsam die Suche nach der Erbsubstanz im 20. Jahrhundert war.



Die heute gängige Synthetische Evolutionstheorie vereint die Theorien Darwins und Alfred Russel Wallaces mit Erkenntnissen aus der Genetik, Paläontologie, Populationsbiologie, Zoologie und Botanik. Lange möchte in seinem Werk zeigen, dass sie das evolutionäre Geschehen nicht hinreichend erfasst. Er plädiert dafür, die Theorie umfassend zu erweitern, insbesondere um die Perspektiven der Evolutionären Entwicklungsbiologie, der Entwicklungsplastizität, der inklusiven Vererbung und der Nischenkonstruktion. In jeweils eigenen Abschnitten stellt er diese Ansätze näher vor und erläutert sie anhand von Beispielen. Zudem beschreibt er Forschungsprojekte, die darauf abzielen, eine erweiterte Synthese der Evolutionstheorie empirisch zu untermauern und ihr eine klare Struktur zu geben.

Der Autor betont immer wieder, die gängige Theorie könne nur unzureichend erklären, wie es in der Evolution zu sprunghaften, komplexen Änderungen im Erscheinungsbild von Organismen komme. Auch spiele der Zufall, in Form von Mutationen, eine kleinere Rolle für das evolutionäre Geschehen als weithin angenommen.

Es seien nicht nur genetische Vorgänge dafür verantwortlich, dass sich Organismen evolutionär verändern, sondern auch solche, die beispielsweise von Zellen und Zellverbänden vermittelt werden. Zudem würden Merkmale nicht bloß über Gene vererbt, sondern ebenso epigenetisch, verhaltensorientiert oder kulturell. Zwischen all diesen Ebenen bestünden vielfältige Wechselwirkungen. Ferner spiele die natürliche Selektion nicht immer eine solch zentrale Rolle im evolutionären Geschehen, wie die Synthetische Evolutionstheorie dies annehme. Schließlich seien Organismen nicht nur passiv der natürlichen Selektion ausgesetzt, sondern konstruierten ihre Umwelt auch aktiv mit.

Das sind alles stichhaltige Punkte, mit denen es sich zu befassen lohnt. Es ist verdienstvoll, dass Lange sie in seinem Buch erörtert und darlegt, mit welchen Herausforderungen die Evolutionsforschung konfrontiert ist.

Leider erweist sich das Buch streckenweise als schwer zugänglich. Dazu tragen der manchmal ausgeprägte Nominalstil und die hohe Dichte an Fachbegriffen bei: »Oder die Extended Evolutionary Synthesis fügt die Bedeutung von Variationstendenz in der Entwicklung und Plastizität bei der Gestaltung phänotypischer Variation hinzu, die der Selektion zur Verfügung stehen.« Der komplizierte

Wie entsteht ein sprunghaft veränderter Phänotyp?

Stoff wäre wohl auch leichter verständlich, wenn er mehr an konkreten, nachvollziehbaren Beispielen vermittelt würde. Zwar präsentiert der Autor in einem eigenen Abschnitt ausgewählte Forschungsergebnisse der Evolutionären Entwicklungsbiologie – empirische Erkenntnisse also dazu, welche Rolle die Individualentwicklung der Lebewesen im evolutionären Geschehen spielt. Das ist ein hochspannendes Thema, über das

Lange selbst gearbeitet hat. Und wenn er sein eigenes Forschungsgebiet beschreibt, die Entstehung überzähliger Finger und Zehen bei Neugeborenen, ist das detailliert und aufschlussreich. Die anderen Beispiele, die er bringt, bleiben aber oft vage. Einige Aussagen im Buch erscheinen wolkig und nicht gut belegt, etwa dass »morphologische Variationen ... zuerst entstehen und nachträglich genetisch stabilisiert werden« könnten, wodurch »phänotypische Modifikation einer genetischen Änderung vorausgehen« könne.

Um zu unterstreichen, dass die Evolutionstheorie ihr Blickfeld stark ausweiten muss, wolle sie sich mit künftigen Veränderungen des Menschen befassen, behandelt Lange in einem der letzten Kapitel die Entwicklung des *Homo sapiens* in der hochtechnisierten Welt von heute und morgen. Dabei streift er die Themen Biotechnologie, künstliche Intelligenz und Transhumanismus – bisweilen mit einem Hang zur Dystopie. Das ist interessant und bringt noch einmal ganz neue Aspekte hinein; diese Themen bieten schon für sich allein genug Stoff für ein eigenes Buch.

Zusammenfassungen am Ende jedes Kapitels helfen bei der Orientierung; die vielen Literaturverweise und Tipps zum Weiterlesen geben zahlreiche Anregungen. Als nützlich erweisen sich zudem das umfangreiche Glossar sowie Kurzporträts etlicher Wissenschaftler(innen) der Evolutionsforschung.

Das Buch lenkt den Blick auf ein wichtiges Wissenschaftsgebiet, verdeutlicht Schwierigkeiten der heutigen Evolutionstheorie und stellt spannende Ansätze wie die Evolutionäre Entwicklungsbiologie vor, die mögliche Auswege weisen. Mit seinen oft abstrakten Ausführungen, seinem mitunter schwer verständlichen Stil und einigen Längen stellt es allerdings hohe Ansprüche an die Leser.

Der Rezensent Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

ALTES SAATGUT ALS GEN-LIEFERANT

Der Ökologe Debal Deb beschrieb seine Versuche, fast verlorene Reissorten mit teils überraschenden Eigenschaften zu erhalten und wieder anzusiedeln. (»Vergessene Körner«, »Spektrum« Juli 2020, S. 38)

Thomas Kolbe, Großweikersdorf: Da ich von der Ausbildung her Agraringenieur und selbst im Bereich Biotechnologie und Gentechnik tätig bin, sind mir in dem Beitrag von Herrn Deb eine Reihe von Punkten aufgefallen.

So soll der Reis mit schuld an der hohen Suizidrate unter indischen Bauern sein. Normalerweise wird dieser Mythos der Gentechnik-Baumwolle nachgesagt. Die Suizidrate unter Nichtlandwirten ist in fast allen Bundesstaaten Indiens höher als unter Landwirten. Unter Bauern sinkt sie seit Jahren, während der Anbau von Hochkultur-Reissorten und Gentechnik-Baumwolle zunimmt.

Der Autor erklärt mit keinem Wort, wie die alten Landrassen mit ihren niedrigen Erträgen 1,35 Milliarden Inder ernähren sollen. Reis als Hauptnahrungsmittel erzeugt chronischen Vitamin-A-Mangel und lässt laut WHO in Asien jährlich 500 000 Menschen erblinden oder gar sterben. Da sind die alten Sorten auch keine Lösung. Das funktionierte nur, als die Bevölkerung wesentlich geringer und die Ernährung abwechslungsreicher war.

Der Vorschlag ist interessant, statt Saatgut tiefgefroren zu lagern, dieses lebend zu erhalten, damit die Pflanzen sich mit Krankheitserregern auseinandersetzen und Resistenzen entwickeln können. Doch wenn eine Sorte durch spontane Mutation eine Eigenschaft erwirbt, wird eine neue Sorte daraus.

Die anfälligen Hohertragssorten sind sicher nicht die Lösung. Sie waren ein Versuch der letzten Jahrzehnte, ausreichend Nahrungsmittel zu produzieren. Inzwischen ist die Gentechnik der Weg der Wahl. Die alten Landrassen sind unbedingt zu bewahren, das stimmt schon. Aber nicht als Saatgut für die Bauern, sondern als Quelle für Genvarianten, die dann – auch in inzwischen vielen Non-Profit-Projekten – die Resistenz etwa gegen Überflutung, Trockenheit und virale Krankheiten als auch einen erhöhten Gehalt an Eisen, Zink, Vitamin A und anderen Stoffen in Hohertragssorten hineinbringen.

INTERESSANTER REALITÄTSCHECK

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Initiative hat sich der Neurologe Ulrich Dirnagl dem Ziel verschrieben, die methodische Qualität biomedizinischer Studien zu verbessern. Denn wie er berichtete, sehen viele das Fach in einer Krise. (»Kulturwandel in der Biomedizin«, »Spektrum« Oktober 2020, S. 38)

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.

Ulrich Karkmann, per E-Mail: Das ist wirklich ein sehr interessanter und gut geschriebener Bericht aus der Realität der biomedizinischen Forschung. Ich würde mir mehr solcher Artikel wünschen – an Stelle der für meinen Geschmack zu häufigen Geschichtenerzählerei aus der Quantenmechanik oder den empirisch nicht überprüfbaren Erzählungen über das Leben von Dinosauriern.

NICHTS WIRKLICH NEUES

Laut Physiker Ward Struyve könnte eine alternative Beschreibung der Quantenmechanik ein verständlicheres Bild liefern und bisherige Probleme lösen. (»Eine klassische Quantenwelt«, »Spektrum« Oktober 2020, S. 12)

Andreas Jungk, per E-Mail: Ich war neugierig auf die Ausführungen. Nachdem aber zum gefühlt 4000-sten Mal die hinlänglich bekannte Historie der Quantenphysik und – natürlich – Schrödingers Katze wiederholt wurde und der Beitrag selbst inhaltlich nichts wirklich Neues bot, dachte ich mir, ich kann es nicht mehr hören, respektive lesen. Der groß angekündigte »neue Blick« ist nichts weiter als ein Eingeständnis, dass die theoretische Physik bei wichtigen Fragen seit Jahrzehnten auf der Stelle tritt. Ich bitte Sie daher, in Zukunft auf solche, in doch irreführender Weise als neu bezeichneten Beiträge zu verzichten und wirklich kritischen Stimmen, die sich mit ungeklärten Großfragen der Wissenschaft auseinandersetzen, mehr Raum zu geben, insbesondere auf dem Gebiet der Quantenphysik. Das würde eine Lektüre Ihrer Zeitschrift wieder richtig spannend machen.



Verzehrende Leidenschaft

Kann denn Liebe Sünde sein? Eine Kurzgeschichte von Danny Dunlavey

Nun ist schon fast ein Monat vergangen, seit ich meinen Ehemann getötet habe – Gary, meinen über alles geliebten Lebenspartner. Ich fühle mich schuldig und verspüre daher den Drang, alle Hinweise auf die Tat zu vernichten. Aber ich glaube, es gibt ohnehin keinerlei Spuren. Außerdem ist das ganz legal. Oder vielmehr, es ist nicht verboten.

Jede Frau weiß, dass es dazu kommen muss. Nur die Männer haben keine Ahnung. Sie finden es erst heraus, wenn es passiert. Gewissermaßen.

Als ich Gary kennen lernte und nach seiner Familie ausfragte, erzählte er mir, er habe rund 100 Geschwister und seine Mutter. Über seinen Vater wusste er kaum etwas, das heißt genau genommen gar nichts. Das sagte er so nebenbei, als ob das ganz natürlich wäre. Nun ja, meinen Vater kenne ich ja auch nicht.

Mama sagte, ich solle mir deswegen keine Sorgen machen. Der Gattenmord liege den Weibchen unserer Spezies eben im Blut. Er sei evolutionär sinnvoll: Wir brauchten die Nährstoffe. Natürlich hatte ich keine konkrete Vorstellung von dem, was sie andeutete. Mama meinte, ich würde es verstehen, wenn es so weit wäre.

Da begriff ich es tatsächlich.

Gestern kam Martha vorbei. Sie redete mir gut zu und versuchte mich zu trösten.

»Julie, denk nicht mehr darüber nach«, sagte sie. »Ich bin sicher, es hat ihm nichts ausgemacht. Glaub mir, er war sehr glücklich, als er starb.«

»Martha, ich habe meinen Mann umgebracht! Das kann ich doch nicht einfach vergessen. Ich habe ihn geliebt, auch wenn seine Vorderextremitäten ein bisschen verkümmert waren. Aber auf die Größe kommt es nicht an.«

»Geliebt hast du ihn? Was redest du da! Vergiss es. Vertrau mir, du wirst dich dran gewöhnen. Weißt du, wie viele Ehemänner ich hatte?«

»Zwölf.«

»Und wie viele habe ich jetzt?«

»Keinen.«

»Und bin ich darüber etwa außer mir?«

»Nein, aber du warst schon immer viel extrovertierter als ich. Wenn die Jungs mich mit ihren klappernden Beißwerkzeugen anbaggerten, lief meine grüne Haut sofort ein wenig rot an.«

»Na und?«, lachte Martha. »Selbst wenn deine Persönlichkeit nicht zum aktiven Paarungsverhalten neigt, wird sich der Instinkt durchsetzen. Und schließlich wirst du einsehen, dass mit dir alles stimmt.«

»Martha, eigentlich ist es gar nicht der Mord an Gary, womit ich nicht fertigwerde.«

»Ach so. Also, was macht dir denn so zu schaffen? Die Tötung ist normalerweise der schwierigste Teil. Danach wird das Ganze viel angenehmer. Streu ein paar Spinnen darüber. Es schmeckt köstlich. Natürlich nicht die Spinnen, die Gefühle zeigen.«

»Martha, es ist Kannibalismus, und das kann ich nicht gut finden.«

»Oh weh, ich habe befürchtet, dass du das sagst. Möchtest du vielleicht einen Termin bei Dr. Pratt ausmachen? Eine ganz hervorragende Seelenmassage. So einfühlsam. Mir hat sie sehr geholfen. Wenn meine Kinder etwas in der Schule anstellen und mich von dem Geschrei fast der Schlag trifft, dann werfe ich ein Valium ein und versinke vorm Fernseher in tiefe Bewusstlosigkeit. Der Gipfel der Entspannung, glaub mir.«

»Na gut. Ich werde hingehen.«

*

Das Sprechzimmer sah nett aus. Dr. Pratt war männlichen Geschlechts. Offensichtlich hatte er sich entschieden, Jungeselle zu bleiben, da er immerhin noch am Leben war. Er musste sich sehr gründlich mit der Frage auseinandergesetzt haben, warum er seinen Vater nicht kannte.

»Zunächst muss ich Sie warnen, Frau Julie«, begann er. »Obwohl gerade Paarungszeit herrscht, bin ich diesbezüglich nicht interessiert. Nichts für ungut! Ihre Vorderglieder und Ihr Brustkorb sind sehr hübsch.«

»Vielen Dank«, erwiderte ich. »Auch Sie sind in höchstem Maß attraktiv, aber hoffentlich werden wir zu einer reifen Vereinbarung als zwei einmütige und ebenbürtige Individuen gelangen, mit dem Ergebnis, dass wir zu beiderseitigem Vorteil keinerlei sexuelle Beziehung eingehen.«

»Ausgezeichnet«, sagte Dr. Pratt. »Nun, Martha hat mir erzählt, dass Sie an gewissen Schuldkomplexen leiden, doch sie hat nicht erklärt, woran genau. Also – wo liegt das Problem?«

»Mein Ehemann ist tot, und ich habe ihn umgebracht«, erklärte ich. »Ich weiß, dass das nicht illegal ist, aber ich finde dennoch, ich habe sein Vertrauen missbraucht, indem ich seinen Kopf abbiss und den ganzen Mann mit Stumpf und Stiel afaß. Ich weiß, das ist irrational. Ich weiß! Was kann ich machen? Ich liebe Gary noch immer.«

»Wie bitte?«, fragte der Psychiater. »Verzeihung, sprachen Sie von Liebe?«

»Jawohl. Liebe.«

»... so, so«, stammelte Dr. Pratt. »Und worum handelt es sich bei dieser Liebe, die Sie erwähnen?«, fragte er und bewegte seiner Vorderglieder fahrig auf und ab.

»Wie soll ich es sagen«, begann ich. »Ich fand einfach, dass Gary gut aussah, sich liebevoll verhielt und ein passender Partner wäre.«

»Oh. Darum geht es nur«, seufzte Dr. Pratt erleichtert. »Wir Mediziner nennen so etwas fachsprachlich Begierde. Vermutlich sind Sie auf das andere Wort irgendwo in alten Bibliotheken oder online gestoßen.«

»Stimmt, da haben Sie Recht«, antwortete ich. »Ich las in letzter Zeit gern in Büchern, die einige Archäologen ins Netz gestellt hatten. Liebe tauchte darin oft auf. Das habe ich wohl ganz vergessen.«

»Nun ja. Die Zivilisation, die noch vor ein paar Jahrhunderten herrschte, damals vor dem chemischen Unglück, unterschied sich drastisch von der unseren«, erklärte der Arzt. »Auf jeden Fall war sie unzulänglich.«

»Jedenfalls«, fuhr er fort, »warum fühlen Sie sich schuldig? Es ist doch nicht so, als wären Sie nicht fähig, einen Partner zu finden. Sie haben unsere Spezies nicht im Stich gelassen.«

»Gary war doch mehr als nur ein passender Sexualpartner! Er war lieb. Er schrieb mir Gedichte, die mich an die Texte erinnerten, die ich online gelesen hatte. Er schwor mir, wir würden für immer zusammenbleiben.«

»Das passt wirklich so gar nicht zu einer Gottesanbeterin«, meinte Dr. Pratt.

»Also, was schlagen Sie vor? Was soll ich tun? Ich kann niemals mehr lieben, nicht nachdem Gary tot ist. Ja sicher, natürlich werde ich alle meine Kinder verantwortungsvoll aufziehen, zum Besten der Spezies ...«

»Nun, vielleicht können Sie jenseits des physischen Universums Trost finden?«

»Jenseits?«, fragte ich. »Wie diese irrationalen Menschen, von denen ich gelesen habe? Bevor das Chemieunglück sie auslöschte? Ich gebe zu, ihre Poesie hört sich nett an, aber die Ideen dahinter ...«

»Genau. Versuchen Sie es damit. In radikalen medizinischen Fachzeitschriften habe ich viel über die heilende Wirkung gelesen. Sie haben da etliche Möglichkeiten: um Vergebung für dies und das flehen; spirituelle Übungen; inneren Frieden finden durch stumme Selbstgespräche ...«

»Gut«, erwiderte ich. »Wenn Sie glauben, dass es hilft.«

»Sehen wir einmal hier nach ...« Dr. Pratt begann in einem Buch auf seinem Tisch zu blättern. »Richtig. Da steht diese eigentümliche Bezeichnung, die unsere Vorfahren in den ältesten Texten gebrauchten – ich denke, sie nannten es Beten.« ◀

DER AUTOR

Danny Dunlavey ist ein US-amerikanischer Schriftsteller aus dem Bundesstaat Maryland. Er liest, sieht Filme und findet sich nicht besonders interessant.

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
 Nature 494, S. 276, 2013

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleitung: 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 Heinkelmann, Natalie Schäfer

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

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

Redaktionsassistent: Andrea Roth

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkte mit: Dr. Michael Springer, 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), des VCBG und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

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

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

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

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

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

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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

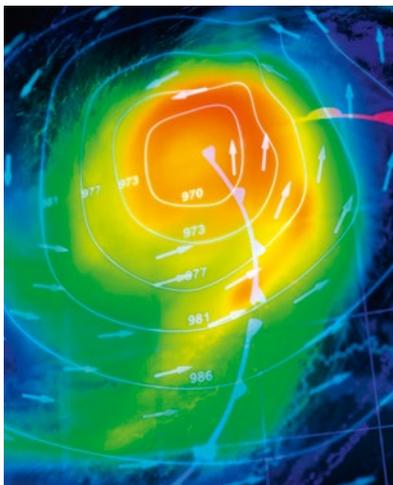


VORSCHAU



HEILSAME MOLEKÜLSCHNIPSEL

Dank neuer Verfahren kann man genetisch bedingte Krankheiten mit kurzen, einzelsträngigen DNA- oder RNA-Stücken therapieren. Diese künstlichen Molekülschnipsel koppeln an passende Boten-RNA-Moleküle im Zielorganismus, womit sie beispielsweise verhindern können, dass der Organismus daraus Proteine herstellt. Damit lassen sich potenziell tödliche Krankheiten wie die spinale Muskelatrophie erfolgreich behandeln.



DIE 28-TAGE-WETTERVORHERSAGE

Nicht nur die Prognosen für die nächsten paar Tage werden ständig verlässlicher. Inzwischen berechnen Meteorologen sogar atmosphärische Vorgänge über Wochen im Voraus und bestimmen weltweite Wettertrends für den kommenden Monat. Das ermöglichen vor allem leistungsfähigere Supercomputer, aber auch ein genaueres Verständnis globaler Klimaphänomene.



SCHWARZE LÖCHER DER EXTREME

Schwarze Löcher schrumpfen bisweilen, doch wenn sie Ladung tragen, bleibt ihre Masse bei einem gewissen Wert stehen. Ergebnisse theoretischer Untersuchungen solcher Exemplare haben möglicherweise weit reichende Konsequenzen für die Physik.



INSEKTEN MIT BEWUSSTSEIN

Bienen sind zu erstaunlichen kognitiven Leistungen in der Lage: Sie kommunizieren, lernen und träumen vielleicht sogar. Verfügen sie damit über ein Bewusstsein? Und wenn ja, wo liegt die Grenze zum unbewussten Dasein?

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!



Schon jetzt an Weihnachten denken und ein **ABO VERSCHENKEN**



ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum** der Wissenschaft für nur € 93,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 72,-), über 10 % günstiger als im Einzelkauf.



KOMBIABO:

Für nur € 6,-/Jahr Aufpreis erhalten Sie Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins (PDF-Format, Angebot für Privatkunden).



Spektrum PLUS:

Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, Leserexkursionen und Redaktionsbesuche.

Jetzt bestellen!

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

www.spektrum.de/abo

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR **38** 17.09.2020

- > Kein Leben in der Venus-Atmosphäre
- > Europas Wälder werden lichter
- > Nicht alle Wikinger waren blonde Skandinavier

TITELTHEMA: CORONA-VAKZINE

Wie Schweine verraten, was ein Covid-19-Impfstoff kann

Schutzimpfungen bewahren Tiere davor, krank zu werden. Auch gegen Coronaviren gibt es Mittel. Sie verraten viel darüber, was eine Impfung gegen Covid-19 zu leisten vermag.

THOMAS MORTON
Der Gründervater der persönlichen Freiheit

GRAVITATIONSWELLEN
Der Traum vom Einstein-Teleskop

PERSÖNLICHKEITSMODELLE
Die Facetten unserer Persönlichkeit

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

