

9.20

Spektrum

der Wissenschaft



Deutschland im Klimawandel

Welche Veränderungen
bevorstehen – und
wie wir ihnen
begegnen können

ASTRONOMIE Rätselhafte Zwerggalaxien
BIOMEDIZIN Umstrittene Patente auf Leben
UMWELT Dem Mikroplastik auf der Spur

www.Spektrum.de 9.20

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



KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ! Ausgewählte **Spektrum KOMPAKT** gibt es auch im Printformat!

€ 4,99
je digitale
Ausgabe



Bestellmöglichkeit und über 250 weitere Ausgaben:

www.spektrum.de/kompakt



EDITORIAL HEISSE ZEITEN

Daniel Lingenhöhl, Chefredakteur
lingenhoehl@spektrum.de

► **Erinnern Sie sich noch an das Jahr 2003?** Damals gab es den ersten »Jahrhundertsommer« des neuen Jahrtausends. Es sollte nicht der letzte bleiben. Seitdem folgten mehrere Jahre mit Temperaturrekorden – darunter die letzten beiden Sommer 2018 und 2019. Ein einzelnes Extremereignis belegt den Klimawandel natürlich nicht, doch der Trend weist bei den Durchschnittstemperaturen eindeutig nach oben. Er ist für Klimawissenschaftler und Meteorologen das wichtigste Indiz dafür, dass sich die Erderwärmung auch schon in Mitteleuropa deutlich bemerkbar macht.

Bei anderen Indikatoren wie dem Niederschlag oder Extremwetterereignissen ist die Faktenlage dagegen noch unklar. Die starke Dürre der beiden Vorjahre deutet allerdings schon an, was uns in Deutschland erwarten könnte: Die Böden haben sich in weiten Teilen des Landes bis heute nicht von der extremen Trockenheit erholt; in tieferen Schichten fehlt mehr Wasser, als die Niederschläge eines normalen Jahres nachliefern könnten.

Das macht sich auf unseren Feldern und in den Wäldern bemerkbar. Auf zehntausenden Hektar sind Bäume abgestorben, und Experten befürchten, dass als Spätfolge noch mehr Fichten oder Buchen verenden werden. Im Gebirge zeigt sich dagegen, dass das Eis selbst in Hochlagen schmilzt: Gletscher schwinden, der Fels bröckelt, weil das Eis als Kitt verloren geht. In der Nordsee wiederum wandern wichtige Fischarten nach Norden oder in die Tiefe ab, weil sich das Meer für sie zu stark erhitzt.

Unsere Experten beschreiben ab S. 12 exemplarisch, wie sich der Klimawandel schon heute in Deutschland zeigt und was wir zukünftig erwarten müssen. Diese Artikel sind der Auftakt zu einer neuen dreiteiligen Serie über die Erderwärmung und wie wir sie erforschen. Und noch einem zweiten ökologisch relevanten Thema werden wir uns in den nächsten Heften mit mehreren Berichten widmen: den Kunststoffen. Ab S. 58 beleuchten Carolin Völker und Johanna Kramm das mittlerweile allgegenwärtige Mikroplastik. Im Gegensatz zum Klimawandel wissen wir bislang nicht genau, wie es sich auf die Umwelt auswirkt. Dennoch sollten wir auch hier handeln – bevor sich womöglich irreparable Schäden zeigen.

Passend zu diesem Thema finden Sie in diesem Magazin übrigens eine Beilage der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) zum 100. Jahrestag der ersten Beschreibung von Makromolekülen – quasi dem Urknall der Polymerchemie. Die Beiträge verfolgen den Weg von der ersten Anwendung bis zu den heutigen Umweltproblemen und ihrer Lösung.

Einen nicht zu schweißtreibenden Restsommer wünscht



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum SPEZIAL** Biologie – Medizin – Hirnforschung 3.20 präsentiert den aktuellen Forschungsstand zu einer typisch menschlichen Fähigkeit.

IN DIESER AUSGABE



CAROLIN VÖLKER, JOHANNA KRAMM

Mikroplastik in der Umwelt ist sowohl ein ökologisches Problem als auch ein gesellschaftliches. Entsprechend betrachten eine Biologin (Völker) und eine Soziologin (Kramm) das Thema ab S. 58 aus ihren jeweils unterschiedlichen Blickwinkeln.



OLIVER MÜLLER

Den Astronomen an der Universität de Strasbourg faszinieren vor allem Zwerggalaxien. Denn detaillierte Beobachtungen an den kleinsten Sterninseln im All bringen das Standardmodell der Kosmologie in Bedrängnis (S. 68).

INHALT

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

26 FORSCHUNG AKTUELL

Die Geburtsstunde der Maya

Archäologen haben in Mexiko den bisher ältesten bekannten Maya-Bau entdeckt.

Inverser Mpemba-Effekt

Einige Stoffe könnten sich schneller erwärmen lassen, wenn man sie zuvor abkühlt.

Vom Stress zum Fieber

Wie unser Gehirn die stressbedingte Wärmeproduktion kontrolliert.

Magische Methylgruppen

Ein neuer Katalysator könnte helfen, Medikamente rascher zu entwickeln.

35 SPRINGERS EINWÜRFE

Quo vadis, Computer?

Kleinere Schaltkreise allein sind nicht die Zukunft.

51 FREISTETTERS FORMELWELT

Rational oder irrational?

Die Euler-Mascheroni-Zahl birgt noch einige Rätsel.

66 SCHLICHTING!

Cappuccino mit Dämpfer

Schaum in der Tasse wirkt wie ein fester Deckel.

80 ZEITREISE

81 LESERBRIEFE

82 REZENSIONEN

88 FUTUR III – KURZGESCHICHTE

89 IMPRESSUM

90 VORSCHAU

12 TITELTHEMA **DEUTSCHLAND IM KLIMAWANDEL**

Neue Serie: Klimawandel (Teil 1) Wie wirkt sich die globale Erwärmung hier zu Lande aus? Wir stellen einige der wichtigsten Trends vor – und Experten geben einen tieferen Einblick in vier Schwerpunktthemen.
Von Diana Rechid, Andreas Bolte, Ralf Weisse, Rita Adrian und Benjamin M. Kraemer

36 EVOLUTION **DIE ERSTEN SÄUGETIERE**

Serie: Die Entfaltung des Lebens (Teil 3) Zahlreiche Fossilfunde offenbaren eine erstaunliche Vielseitigkeit der frühen Säuger und ihrer Vorläufer.
Von John Pickrell

44 PATENTE **NATUR ALS »ERFINDUNG«**

Lassen sich Patente auf Lebewesen oder Naturprodukte erteilen? Das ist seit mehr als 100 Jahren ein Streitthema. Die rasanten Fortschritte in den Lebenswissenschaften verschärfen diese Debatte noch.
Von Tobias Ludwig

52 KI **DIE ZUKUNFT DER RADIOLOGIE**

Radiologen verwenden immer häufiger Algorithmen, um Krankheiten in medizinischen Scans von Patienten zu erkennen. Doch wer ist verantwortlich, wenn den Programmen ein Fehler unterläuft?
Von Sara Reardon

58 ÖKOLOGIE **DEM MIKROPLASTIK AUF DER SPUR**

Neue Serie: Kunststoffe heute und morgen (Teil 1) Wie fein verteilte Plastikpartikel auf Ökosysteme und Lebewesen wirken, beginnen Forscherinnen und Forscher erst allmählich zu verstehen.
Von Carolin Völker und Johanna Kramm

68 ZWERGGALAXIEN **KOSMISCHES PLANKTON**

Die vielen kleinen Sternsysteme in unserer galaktischen Umgebung verhalten sich ganz anders, als es laut Simulationen zu erwarten wäre.
Von Oliver Müller

74 MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
RÄTSELHAFTE NULLSTELLEN

Eine abstrakt definierte Menge liefert ein unerwartetes Bild, das fraktale Strukturen zeigt. Inzwischen können es Mathematiker erklären.
Von Christoph Pöppe

TITELBILD:
VEGEFOX.COM / STOCK.ADOBE.COM.
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

12

TITELTHEMA
DEUTSCHLAND
IM KLIMAWANDEL



VEGEOX.COM / STOCK.ADOBE.COM, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT



ILLUSTRATION: DAVIDE BONADONNA, PICKRELL, J., THE MAKING OF HUMANICS, NATURE 374, 2019

36

EVOLUTION
DIE ERSTEN
SÄUGETIERE

METAMORPHOSIS / GETTY IMAGES / ISTOCK

52

KÜNSTLICHE
INTELLIGENZ
DIE ZUKUNFT DER
RADIOLOGIE



CAROLIN VÖLKER

58

ÖKOLOGIE
MIKROPLASTIK AUF DER SPUR



74

MATHEMATISCHE
UNTERHALTUNGEN
RÄTSELHAFT E NULLSTELLEN

MIT FOTIL GEN. VON ANDREJ BAUER (MATIL ANDREJ.BAUER@ZDF.DE) (© FOTIL GEN. VON ANDREJ BAUER)



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

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

SPEKTROGRAMM



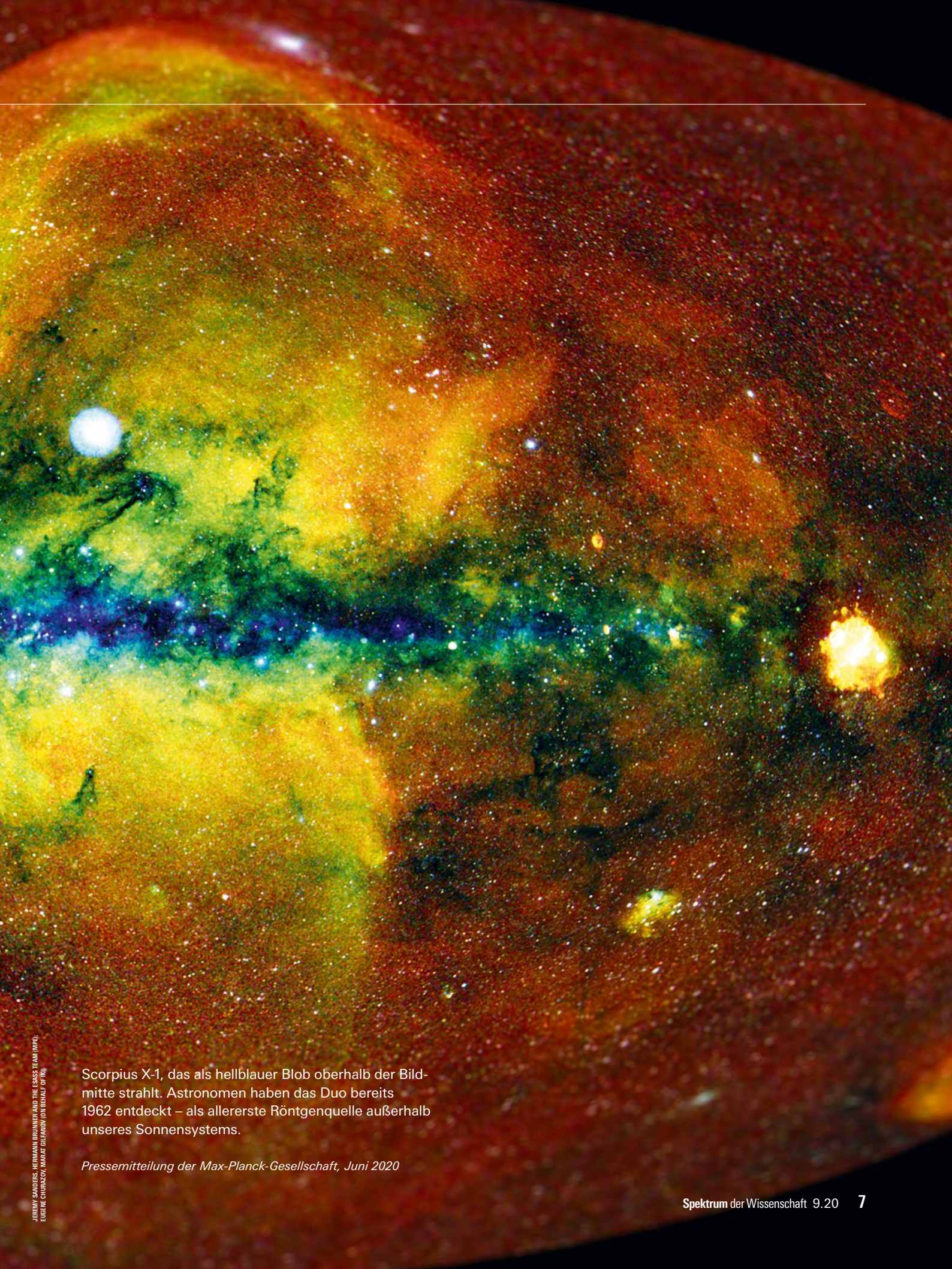
BLICK AUF DEN RÖNTGENHIMMEL

▶ Seit einem Jahr sucht eRosita das All systematisch nach Regionen ab, in denen Röntgenstrahlung entsteht. Gut eine Million der energiereichen Quellen hat das Weltraumteleskop bereits aufgespürt – mehr als doppelt so viele, wie vor seinem Start bekannt waren.

Dieses Himmelspanorama haben unter anderem Forscher des Garching Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik aus Einzelaufnahmen zusammengesetzt. Bereiche, in denen eRosita relativ energiearme Röntgenphotonen aufgefangen hat, sind rot eingefärbt. Gelbe, grüne und blaue Bildpunkte stehen für Strahlungs-

quanten mit zunehmend größerer Energie. Ins Auge fällt vor allem das Band der Milchstraße.

Einige der sichtbaren Quellen sind Überreste von Supernova-Explosionen, etwa die 800 Lichtjahre entfernte Vela, die man als runde gelbe Wolke in der rechten Bildhälfte erkennen kann. In anderen Systemen saugt ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch das Gas eines Sterns ab und sammelt es in einer leuchtenden Akkretionsscheibe. Ein berühmtes Beispiel dafür ist



JEREMY SANDERS, HERMANN BRUNNER AND THE ESA/ISS TEAM (TOP);
EUGENE CHURAZOV, NARAYAN GURANOV (ON BEHALF OF INI)

Scorpius X-1, das als hellblauer Blob oberhalb der Bildmitte strahlt. Astronomen haben das Duo bereits 1962 entdeckt – als allererste Röntgenquelle außerhalb unseres Sonnensystems.

Pressemitteilung der Max-Planck-Gesellschaft, Juni 2020

SPEKTROGRAMM

PALÄONTOLOGIE FARBEN IM BERNSTEIN

► Der Bernstein einer Mine aus Myanmar hat die Farben von Insekten auf herausragende Weise konserviert. Selbst nach 99 Millionen Jahren ist der bläuliche Glanz der Körperpartien noch gut sichtbar. Das sei ein absoluter Ausnahmefall, berichtet ein Team um Cai Chenyang von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Nanjing.

Bei gewöhnlichen Fossilien lässt sich nicht mehr sagen, welche Farbe

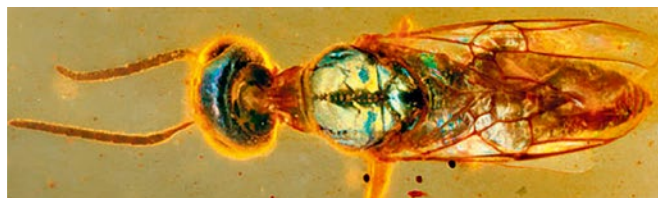
sie einst hatten, denn im Lauf der Zeit verändern sich die Pigmente. Forscher können dann nur noch auf Umwegen ermitteln, wie Tiere aussahen, etwa indem sie die chemische Zusammensetzung von Reptilienhaut oder Vogelfedern ermitteln. Bei Insekten ermöglicht manchmal die Nanostruktur der Panzer Rückschlüsse: Sie reflektiert nur das Licht bestimmter Wellenlängen und kann im Idealfall über die Jahrmillionen erhalten bleiben.

Die ältesten auf diese Weise rekonstruierten Farben stammten bisher von rund 48 Millionen Jahren alten Lebewesen. Die Funde aus Myanmar erlauben nun, doppelt so weit zurückzublicken. Der Bernstein hat hier unter

anderem diverse Wespen eingeschlossen, deren Panzer auf Grund der Nanostruktur einen blaugrünen Glanz hat. Dieser müsste bereits vor 99 Millionen Jahren sichtbar gewesen sein. Wie empfindlich die Farbgebung ist, erlebten die Forscher selbst: Bei einigen Proben gingen die Farben durch das Präparieren verloren, stattdessen schimmern die Tiere nun silbern. Die Insekten bewohnten im Zeitalter der Dinosaurier vermutlich einen tropischen Wald, entsprechend haben die Farben wohl der Tarnung gedient.

*Proceedings of the Royal Society
10.1098/rspb.2020.0301, 2020*

In Bernstein aus Myanmar sind diverse Wespenarten sowie in einem Fall auch eine Ameise (Bild links oben) erhalten geblieben – inklusive ihrer einstigen Farbe.



MINERALOGIE GRÖSSTER STEINMETEORIT DEUTSCHLANDS

Der größte jemals in Deutschland gefundene Steinmeteorit lag 31 Jahre lang in einem Garten westlich von Ulm – und ist erst vor Kurzem als das erkannt worden, was er ist. Der Meteorit Blaubeuren ist nach seiner Fundstadt benannt und mit 30,26 Kilogramm deutlich schwerer als der bisherige Rekordhalter Benthullen. Dieser bringt es auf 17,25 Kilogramm und war nach dem Zweiten Weltkrieg unweit von Oldenburg geborgen worden.

Der Finder von Blaubeuren stieß dagegen 1989 auf den neuen Rekordbrocken, beim Ausheben eines Kabelgrabens auf seinem Grundstück. Mit



Der Meteorit »Blaubeuren« misst 28 x 25 x 20 Zentimeter und ist lange im Erdboden verwittert.

einem Magneten stellte der Mann fest, dass der ungewöhnlich schwere Klumpen Eisen enthalten muss. Doch erst Anfang 2020 kam ihm die Idee, sich beim Institut für Planetenforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zu melden.

Nach Auffassung der dortigen Experten handelt es sich bei dem Fund um einen gewöhnlichen Chondriten

des Typs H4-5. Chondrite bilden mit einem Anteil von etwa 86 Prozent die größte Klasse der Meteoriten. Ihr Name kommt von den kleinen, eingeschlossenen Silikat-Kügelchen, den so genannten Chondren, die in eine feinkörnige Grundmasse eingebettet sind. Die Chondren sind bei der Entstehung des Sonnensystems vor 4,5 Milliarden Jahren hervorgegangen und stellen die Urbausteine aller Planeten dar. Das H steht für »high metal«, also einen hohen Gehalt an metallischem Eisen und Nickel.

Inzwischen hat ein Steinmetz dem Meteoriten ein Eckchen abgesägt, damit Experten im Labor dessen Zusammensetzung untersuchen können. Die Konzentrationen an Barium- und Strontiumisotopen bestätigten demnach, dass der Meteorit für längere Zeit im schwäbischen Juraboden verwitterte. Womöglich ist er schon vor mehreren Jahrhunderten auf die Erde gestürzt. Davor war Blaubeuren wahrscheinlich an einer Kollision im Weltall beteiligt. Nur so lässt sich erklären, dass sein Inneres aus Bruchstücken unterschiedlicher Herkunft zusammengesetzt ist.

Pressemitteilung des DLR, Juli 2020

GENETIK OZEANÜBERQUERUNG VOR KOLUMBUS

Im Jahr 1947 überquerte der Entdecker und Archäologe Thor Heyerdahl in 101 Tagen den Pazifik auf einem Floß aus Balsaholz. Mit dieser fast 7000 Kilometer langen Reise versuchte er die wissenschaftliche Gemeinschaft davon zu überzeugen, dass es bereits lange vor Kolumbus zu Kontakten zwischen den Ureinwohnern Südamerikas und den Völkern Polynesiens gekommen war.

Nun meint ein Team um Alexander Ioannidis von der Stanford University, Heyerdahls These mit genetischen Daten untermauern zu können. Die Forscher haben das Erbgut von gut 800 polynesischen und indianischen Ureinwohnern analysiert und sind dabei auf Hinweise auf eine Vermi-

schung der beiden Gruppen zwischen den Jahren 1150 und 1230 gestoßen. Demnach muss es bereits Jahrhunderte vor der Ankunft der Europäer Begegnungen zwischen der südamerikanischen und der polynesischen Bevölkerung gegeben haben.

Frühere Genomstudien waren in dieser Frage zu widersprüchlichen Ergebnissen gekommen. Sie richteten ihren Blick jedoch vor allem auf die Osterinsel »Rapa Nui«, die den geringsten Abstand zum südamerikanischen Festland aufweist. Die neue Studie legt nun jedoch nahe, dass der erste Kontakt weiter nordwestlich stattfand, etwa auf den südlichen Marquesas. Mehrere der dort heimischen Populationen weisen genetische

Spuren von Vorfahren aus dem heutigen Kolumbien auf.

Womöglich sei von dort um das Jahr 1200 eine einzelne Gruppe Seefahrer aufgebrochen und habe sich letztlich auf einer der Pazifikinseln niedergelassen, mutmaßen die Studienautoren. Die Südamerikaner hätten sich dann mit Polynesiern vermischt, die wenig später eintrafen. Dieses Szenario erscheine mit Blick auf die Ozeanströmungen am wahrscheinlichsten. Aber auch das Gegenteil sei denkbar: Dass es Polynesier damals bis nach Kolumbien schafften – und anschließend wieder zurücksegelten.

Nature 10.1038/s41586-020-2487-2, 2020

BIOLOGIE BAKTERIEN ERNÄHREN SICH VON MANGAN

► Eigentlich wollte Jared Leadbetter, Professor für Umweltmikrobiologie am California Institute of Technology, nur ein Glas säubern, in dem sich das chemische Element Mangan abgelagert hatte. Daher weichte er das Gefäß mit Wasser ein – und vergaß es im Spülbecken. Drei Monate später war der Krug schwarz. Zusammen mit einem Mitarbeiter untersuchte Leadbetter daraufhin die Ablagerungen. Dabei stieß er auf Bakterien, die offensichtlich von dem Metall leben.

Mangan gehört zu den häufigsten Elementen auf der Erdoberfläche. Die neu entdeckten Bakterien verwenden anscheinend den Sauerstoff aus Mangankarbonat (MnCO_3) und gewinnen damit ihre Energie. Dabei entsteht dunkles Mangandioxid (MnO_2), ebenfalls bekannt als Braunstein. Die beiden Forscher schlagen für die Bakterienart daher den Namen *Manganitrophus noduliformans* (»Mangan fressende Knöllchenbildner«) vor.

Mikroben, die sich von Metallverbindungen ernähren, sind schon lange bekannt. So ist die Existenz von Kleinstlebewesen, die Mangan oxidieren, nur auf den ersten Blick überraschend. Fachleute halten entsprechen-



de Bakterien bereits seit mehr als einem Jahrhundert für wahrscheinlich. Allerdings war es bisher nicht gelungen, diese aufzuspüren.

Die nun zufällig entdeckte Art stammt wahrscheinlich aus dem Leitungswasser. Leitungen werden immer wieder durch Manganoxide verstopft – vermutlich haben die Biologen um Leadbetter nun den Verursacher dingfest gemacht. Die Entdeckung hilft auch, die Geochemie des

Grundwassers besser zu verstehen. Denn manche der dort lebenden Bakterien veratmen bei Sauerstoffmangel Manganoxid, bei dem bislang unklar war, woher es stammt. Doch nicht nur hier könnten die »Manganfresser« eine Lücke füllen: Womöglich sind sie auch die Urheber der Manganknollen am Grund der Ozeane.

Nature 10.1038/s41586-020-2468-5, 2020

AERODYNAMIK DER TRICK FLIEGENDER SCHLANGEN

► Schlangen gehören nicht zu jenen Tieren, die für ausgefeilte Flugkünste gemacht scheinen. Aber dennoch können manche von ihnen ein Stück durch die Luft gleiten, etwa wenn sie sich an einem Abhang bewegen oder von einem Baum zum nächsten springen. Eine Arbeitsgruppe um Isaac Yeaton vom Virginia Polytechnic Institute and State University hat nun herausgefunden, wie die Reptilien ohne jegliche Tragflächen Auftrieb entwickeln.

Dazu ließ das Team Schmuckbaumnattern (*Chrysopelea*) in einer ausge-

polsterten Halle aus acht Meter Höhe zu Boden hüpfen. Mit Sensoren erfasste die Gruppe die genauen Bewegungen und machte sie anschließend zur Basis einer Computersimulation. Sie zeigt nach Ansicht der Forscher, dass die Tiere durch zielgerichtete Schlangelbewegungen Instabilitäten während des Flugs ausgleichen.

Ohne sie fallen die Reptilien fast direkt zu Boden, da sie sich dann unkontrolliert um zwei der Rotationsachsen drehen – Aerodynamiker sprechen von instabiler Lage beim Rollen und Nicken. Fliegende Schlan-

gen verhindern das, indem sie ihren Körper zu einem flachen Dreieck zusammenschieben und ihn zwei Wellenbewegungen ausführen lassen: Für jeden Schlenker zur Seite macht die Schlange im selben Moment zwei kleine nach oben und unten.

So verlagert sich einerseits ihr Schwerpunkt, was die Gleitbewegung stabiler macht. Andererseits optimieren die Tiere den Anströmwinkel der Luft und erhalten dadurch in begrenztem Maß Auftrieb.

Nature Physics 10.1038/s41567-020-0935-4, 2020

ASTROPHYSIK MYSTERIÖSES GRAVITATIONSWELLENSIGNAL

► Am 14. August 2019 ließ ein sonderbares Signal die Observatorien LIGO und Virgo aufhorchen: 780 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt kam es demnach zu einem Zusammenstoß zwischen einem Schwarzen Loch, 23-mal so schwer wie unsere Sonne, und einem Partner mit nur 2,6 Sonnenmassen. Das Ereignis weicht damit klar von den bisher aufgezeichneten kosmischen Kollisionen ab, bei denen jeweils ähnlich schwere Partner ineinander rasten – und dabei große Mengen Gravitationswellen abstrahlten.

Solche Erschütterungen der Raumzeit entstehen überall dort, wo große Massen stark beschleunigt werden. Meist gehen sie auf Paare aus Schwar-

zen Löchern zurück, die sich immer enger umkreisen und schließlich verschmelzen. In bislang zwei Fällen konnten Forscher auch die Raumzeitbeben aus dem Totentanz zweier Neutronensterne aufzeichnen.

Das neue Signal mit der Bezeichnung GW190814 passt wegen der großen Massendifferenz auf den ersten Blick in keine dieser Kategorien. Stattdessen könnte es sich um eine dritte Signalklasse handeln: Möglicherweise hat das Schwarze Loch mit 23 Sonnenmassen einen Neutronenstern verschlungen. In diesem Fall wäre das Exemplar jedoch schwerer gewesen als alle bekannten Neutronensterne, die normalerweise maximal

2,5 Sonnenmassen erreichen. Somit ist ein anderes Szenario plausibler: dass es sich bei dem leichteren Kollisionspartner um ein zweites Schwarzes Loch handelte.

Das wäre allerdings ebenfalls ungewöhnlich. Explodierende Sterne lassen nur Schwarze Löcher mit fünf oder mehr Sonnenmassen zurück. Erklärbar wäre der sonderbare Partner dagegen, wenn er bei der Verschmelzung zweier Neutronensterne entstanden ist. Bei einem solchen Ereignis können sich vermutlich leichtere Schwarze Löcher bilden.

The Astrophysical Journal Letters
10.3847/2041-8213/ab960f, 2020

PALÄONTOLOGIE WINZIGER AHNE DER DINOSAURIER

► Beim Wort »Dinosaurier« dürften die meisten Menschen wohl an die enorme Größe vieler der ausgestorbenen Reptilien denken. Zu ihnen zählen die mächtigsten bislang bekannten Landwirbeltiere. Und auch ihre Verwandten, die Ptero- oder Flugsaurier, setzten einen Größenrekord für Tiere, die sich je durch die Luft bewegen.

Doch die Vorfahren dieser Giganten waren womöglich das genaue Gegenteil davon. Darauf deutet jedenfalls ein Fund aus Madagaskar hin, den nun ein Team um Christian Kammerer vom North Carolina Museum of Natural Sciences beschrieben hat. Bei ihm geht es um ein 237 Millionen Jahre altes Fossil, das bereits 1998 entdeckt wurde. Der Analyse zufolge handelt es sich um einen frühen Vertreter der Ornithodira, zu denen der letzte gemeinsame Vorfahre der Dino- und Pterosaurier gehörte.

Das Besondere an dem Exemplar: Es war zu Lebzeiten gerade einmal zehn Zentimeter groß. Verschleißspuren an den kegelförmigen Zähnen des winzigen Reptils deuten darauf hin,

dass es sich von Insekten ernährte. Kammerer und sein Team tauften das Tier deshalb auf den Namen *Kongonaphon kely*, was so viel wie »kleiner Insektentöter« bedeutet.

Der Winzling ist nicht der erste kleine Vertreter der Ornithodira, auf den Wissenschaftler nahe dem evolutionären Ursprung der Gruppe gestoßen sind. Bislang ging man allerdings davon aus, dass Arten mit geringer Körpergröße eher eine Ausnahme darstellten.

Die Paläontologen aus North Carolina sehen das anders: Laut ihren Daten hätten die frühen Vertreter der Ornithodira zwischenzeitlich eine Art Miniaturisierung durchlaufen, und

ihre Größe hätte erst später mit den Dino- und Flugsauriern wieder zugenommen.

Seine speziellen Ernährungsgewohnheiten und die geringe Größe halfen *Kongonaphon kely* vermutlich dabei, eine Nische zu finden, die nicht bereits von anderen Reptilien besetzt war. Da die Speicherung von Körperwärme für derart winzige Spezies eine Herausforderung darstellt, könnte dies eine Gründe dafür sein, warum viele der späteren Dino- und Pterosaurierarten eine flauschige Hautbedeckung besaßen, sei es in Form von einfachen Filamenten oder von Federn.

PNAS 10.1073/pnas.1916631117, 2020



Kongonaphon kely war nur zehn Zentimeter groß und ernährte sich von Insekten.

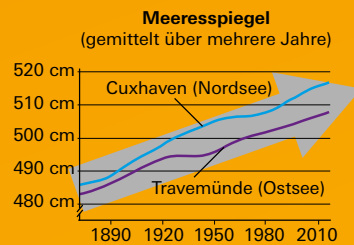
TITELTHEMA

DEUTSCHLAND IM KLIMAWANDEL

Die weltweiten Klimaveränderungen wirken sich auch hier zu Lande aus. Womit müssen wir in Mitteleuropa in den kommenden Jahrzehnten rechnen? Und was können wir tun, um unsere Ökosysteme und Infrastrukturen robuster zu machen? Wir stellen einige der wichtigsten Trends vor – und Experten geben einen tieferen Einblick in vier Schwerpunktthemen.

Küsten unter Druck

Der steigende Meeresspiegel macht Sturmfluten bedrohlicher. Bauwerke und Pumpen sollen die dicht besiedelten Lebensräume schützen. ▶ S. 21



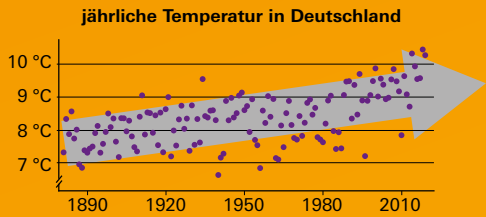
Eine andere Landwirtschaft

Während Wetterextreme direkt Ernteverluste verursachen, wirken manche Folgen des Klimawandels subtiler und langfristiger. Landwirte müssen etwa mit neuen Schädlingen umgehen, alternative Bewässerungsmethoden finden und teilweise andere Pflanzensorten anbauen. ▶ S. 16

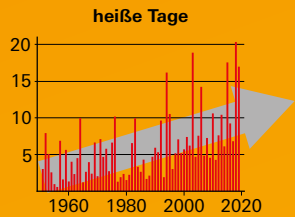
Gestresste Städte

Der so genannte Wärmeinseleffekt heizt Städte im Vergleich zum Umland deutlich auf. Gebäude schirmen Wind ab, gleichzeitig absorbieren Dächer, Beton und Asphalt Sonnenstrahlung. Obendrein erzeugt das Stadtleben selbst Wärme. An kühlender Verdunstung fehlt es mangels Grün vielerorts, und Regenwasser sammelt sich nicht, sondern fließt schnell ab.

Um der Entwicklung gegenzusteuern, setzen Stadtplaner zunehmend auf ein verbessertes Mikroklima: schattige Rückzugsorte, Bäume und begrünte Fassaden oder Dächer – die zudem die Starkniederschläge bei Sommergewittern abpuffern, bevor sie die Kanalisation überlasten.

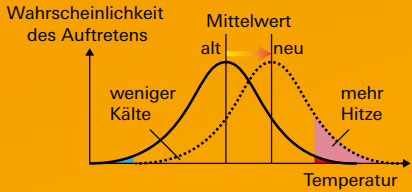


Datenquelle: Deutscher Wetterdienst; eigene Bearbeitung



Warme Luft und Hitze

Die Lufttemperatur ist in Deutschland seit 1881 im Schnitt um 1,5 Grad Celsius gestiegen. Gleichzeitig nimmt die Zahl der heißen Tage mit mehr als 30 Grad zu, während es tendenziell weniger Frosttage mit dauerhaft unter null Grad gibt.

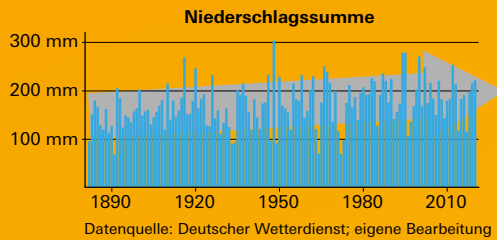


Die durchschnittliche Temperatur ist mit den Hitzeextremen verknüpft: Erhöht sich der Mittelwert in der Verteilung, werden große Werte viel häufiger überschritten.



Nasse Winter

Es schneit seltener, aber insgesamt gibt es im Winter mehr Niederschläge. Die jährlichen Werte schwanken, doch bis 2020 waren es im Trend 48 Millimeter (rund ein Viertel) mehr als im langfristigen Mittel von 1961 bis 1990. Für die Sommermonate zeichnet sich bisher kein klarer Verlauf ab. Fachleute erwarten in Zukunft mehr Starkniederschläge – im Sommer wie im Winter.



Datenquelle: Deutscher Wetterdienst; eigene Bearbeitung

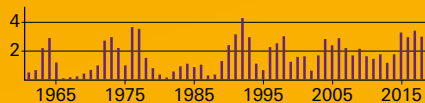
Wälder im Umbruch

Die Zusammensetzung unserer Wälder ändert sich grundlegend. Auf weiten Flächen dominieren künftig voraussichtlich nicht mehr die heutigen Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche. Auf dem Weg braucht es aktive Anpassung. ▶ S. 18

Knappes Grundwasser

Höhere Temperaturen bedeuten mehr Verdunstung. Zudem nehmen im Sommer trockenere und im Winter gesättigte Böden Niederschläge oft weniger gut auf. Die Grundwasserstände sinken in immer mehr Monaten unter die langjährig gemittelten niedrigsten Werte.

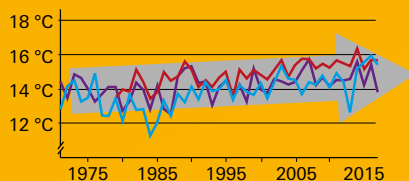
Monate mit Unterschreitung des mittleren niedrigsten Grundwasserstands (Vergleich mit Durchschnitt 1971-2000)



Seen im Fluss

Die deutschen Binnengewässer sind im Lauf der Jahrzehnte wärmer geworden. Das beeinflusst die dortigen Ökosysteme und ihre Rolle im Kohlenstoffkreislauf auf komplexe Weise. ▶ S. 23

Wassertemperatur in Seen (Saisonmittel, Oberflächenwasser)



■ Stechlinsee
■ Müggelsee
■ Bodensee



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

► [spektrum.de/artikel/1752440](https://www.spektrum.de/artikel/1752440)

Geografisch liegt Deutschland zwischen dem vom Meer geprägten Klima im Westen Europas und den großen Landmassen im östlichen Teil des Kontinents. Die Auswirkungen des Klimawandels werden hier zu Lande so vielfältig sein wie die Landschaften: von den flachen Küsten bis zu den Mittelgebirgen und schließlich den Alpen, von städtischen Ballungszentren über landwirtschaftlich geprägte Gebiete bis zu großen Waldflächen, die fast ein Drittel des Landes bedecken.

Allerdings wirkt überall die gleiche Physik. Das ermöglicht immerhin gewisse allgemeine Aussagen. So strahlt unser Planet ständig Wärme ab in Richtung Weltall. Gelegentlich wird sie auf dem Weg dorthin in der Atmosphäre aufgehalten – sie trifft auf Kohlenstoffdioxidmoleküle und regt sie zu Schwingungen an. Das CO₂ gibt die Energie später wieder an die Umgebung ab. Weil der Gehalt des Gases in der Luft derzeit zunimmt, wird diese immer wärmer. Wärmere Luft kann wiederum mehr Wasserdampf aufnehmen.

Doch bei den konkreten Auswirkungen solcher Feststellungen wird es schwieriger. Wenn Luft mehr Feuchtigkeit speichern kann, sollte es stärker regnen – schließlich muss das Wasser irgendwann wieder herunterkommen. Aber wo und zu welchen Zeiten? Welche weiteren physikalischen Prozesse sind wichtig und wirken einzelnen Effekten möglicherweise entgegen oder verstärken sie?

Hier kommen Klimamodelle ins Spiel. Seit einem halben Jahrhundert versuchen Wissenschaftler mit Hilfe von Algorithmen und Simulationen die entscheidenden Zusammenhänge zu erfassen. Die Berechnungen können sich der

Realität nur annähern, das gelingt aber immer besser. Die Forscher ergründen unverstandene Mechanismen, binden sie ein und speisen zunehmend leistungsfähige Rechner mit mehr und mehr Parametern. Dabei unterliegt jedes Modell verschiedenen Unsicherheiten, die etwa von der Programmierweise und der Wahl der Anfangsbedingungen abhängen. So genannte Ensembles von Simulationen, das sind viele einzelne unter leicht veränderten Voraussetzungen oder mit unterschiedlichen Modellen, liefern eine Bandbreite möglicher Entwicklungen. Wie zuverlässig sind solche Rechnungen – gerade für die Größenordnung einzelner Länder?

Startet man neue Modelle mit jahrzehntealten Daten, lässt sich abschätzen, ob sie die gegenwärtigen Bedingungen gut wiedergeben. Solche Rückvergleiche sind wichtige Standardtests, aber freilich nicht völlig unabhängig. Denn schließlich haben die Klimawissenschaftler ihre Modelle im Bewusstsein der tatsächlichen heutigen Bedingungen erstellt. Strikter ist die Überprüfung anhand von Daten, die noch nicht bekannt sein konnten. Das ist auch ohne Glaskugel möglich, nämlich mit Hilfe älterer Simulationen. Bereits diese waren recht treffsicher. 2019 zeigte ein Team um Zeke Hausfather von der University of California in Berkeley: 14 von 17 Projektionen mit Modellen aus den 1970er bis 2000er Jahren passen gut zu der weltweiten Klimaentwicklung in der Zeit nach ihrer Veröffentlichung (wenn man fairerweise einrechnet, dass die Autoren die Treibhausgasemissionen in den Folgejahren noch nicht kennen konnten und in dieser Hinsicht teilweise danebenlagen).

Vom globalen Modell zur lokalen Realität

Für viele konkrete Entscheidungen sind die regionalen Konsequenzen wichtig. Wie sollen wir heute Infrastrukturen planen, welche Baumarten pflanzen, damit sie Jahrzehnte gut überdauern? Weltumspannende Berechnungen arbeiten in der Regel bloß mit einer recht groben räumlichen Auflösung im Bereich hunderter Kilometer. Regionale Modelle können dann die so ermittelten Randbedingungen aufgreifen, auf feinere Skalen von typischerweise einigen zehn Kilometern anpassen und so die Folgen etwa für das Klima in Europa und in Deutschland ermitteln.

An der Basis all dessen stehen Beobachtungsdaten, und an ihnen messen sich wiederum die Simulationen. Deutschlands nationale meteorologische Einrichtung, der Deutsche Wetterdienst, betreibt rund 200 Wetterwarten und automatische Stationen und greift zusätzlich auf etwa zehnmal so viele Standorte ehrenamtlicher Beobachter zurück. Hinzu kommen Satelliten und weitere Arten der Erfassung. Einzelne Werte schwanken zwar naturgemäß, aber nach Jahrzehnten zeigen sich Trends. Sie vermitteln vielfach schon einen Eindruck von dem, was sich hier zu Lande in den vergangenen Dekaden verändert hat.

Über die gesamte Erdoberfläche gemittelt hat sich die Luft seit dem Ende des 19. Jahrhunderts um etwa 1,1 Grad Celsius erwärmt. In Deutschland fällt der Anstieg stärker aus: Hier sind es den langjährigen Messungen zufolge 1,5 Grad. Wenn sich der Mittelwert der Temperaturverteilung zu höheren Werten verschiebt, sollte dasselbe mit den Extremereignissen an ihren Rändern passieren. Mangelt es

AUF EINEN BLICK INMITTEN DES GESCHEHENS

- 1 Die Folgen des globalen Klimawandels sehen wir in Deutschland bereits in langfristigen Messdaten, etwa bei veränderten Vegetationsperioden, steigenden Meeresspiegeln und heißeren Sommern.
- 2 Regionale Klimamodelle erlauben Einblicke in mögliche zukünftige Entwicklungen. Ihnen zufolge werden Extremereignisse wie die Trockensommer 2018 und 2019 wohl häufiger auftreten.
- 3 Die Veränderungen treffen vielfältige Bereiche vom Küstenschutz über Forst- und Landwirtschaft bis zum Städtebau und stellen diese vor ganz individuelle Herausforderungen.

SERIE **Klimawandel**

Teil 1: **September 2020**

Deutschland im Klimawandel

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

Teil 2: **Oktober 2020**

Aus der Vergangenheit lernen

Tim Kalvelage

Teil 3: **November 2020**

Wie Klimamodelle entstehen

Armin Iske und Stephan Juricke

während einer Hitzewelle dann noch wochenlang an Regen, wird die Situation schnell bedrohlich, wie wir es jüngst in den Trockensommern 2018 und 2019 erlebt haben.

Doch Wetterextreme sind die seltenen Ergebnisse komplizierter Zusammenhänge. Für viele einzelne Ereignisse – ob Hitze- oder Kältewellen, Starkniederschläge oder Stürme – mag es zwar naheliegend erscheinen, sie als Folge des Klimawandels zu verbuchen. Ganz so einfach ist es aber nicht: Gab es Hochwasser und Dürren nicht schon immer? Das Klima in Deutschland ist ohnehin sehr variabel. Wie soll man erkennen, ob ein Ereignis nicht so auch in einer Welt ohne Klimawandel nur auf Grund einer besonders unglücklichen Wetterlage eingetreten wäre?

Die Frage steht im Mittelpunkt der so genannten Attributionforschung, welche die deutsche Klimatologin Friederike Otto, die in Oxford forscht, mitbegründet hat. Die noch junge Disziplin wächst rapide, seit zunehmend Rechenkapazität für Simulationen zur Verfügung steht und seit die neueste Generation regionaler Klimamodelle mit kleinräumigen Vorkommnissen wie Starkregen umgehen kann. Mit sehr vielen unterschiedlichen Durchläufen ihrer Algorithmen erschaffen die Fachleute quasi eine virtuelle Welt ohne Klimawandel und ergründen, wie oft dort individuelle Extremereignisse auftreten würden – und somit ob sie durch die globale Erwärmung wahrscheinlicher geworden sind. Für statistisch robuste Aussagen zu einem konkreten Vorkommnis kann der Vergleich tausende simulierte Jahre erfordern. Beispielsweise ergab eine Analyse unter der Leitung von Robert Vautard vom französischen Institut Pierre Simon Laplace und Geert Jan van Oldenborgh vom Königlich-Niederländischen Meteorologischen Institut für den Fall der Hitzewelle in Westeuropa Ende Juli 2019, in der Deutschland neue Temperaturrekorde verzeichnet hat: Ohne den Klimawandel wäre das Risiko dafür etwa zehnmal kleiner gewesen.

Jeder einzelne Fall kann Zufall sein, doch – um eine vom US-amerikanischen Klimawissenschaftler James Hansen geprägte Analogie zu verwenden – wie bei einem gezinkten Würfel verschiebt der Klimawandel die Wahrscheinlichkeiten. Zu dem Effekt kommt Deutschlands geografische Lage. Insbesondere im Sommer prägt der so genannte Jetstream unser Wetter. Das Starkwindband wird durch den Temperaturunterschied zur kalten Arktis angetrieben. Doch weil sich diese durch den Klimawandel bereits dras-

tisch erwärmt hat, schwächelt der Jetstream und schlägt stärker zu den Seiten aus. Das friert Hoch- und Tiefdruckgebiete regelrecht ein, statt sie weiter zu befördern – eine Witterung kann dadurch sehr lange anhalten (siehe »Spektrum« Juli 2019, S. 54).

Mit den steigenden Temperaturen nimmt die mittlere jährliche Zahl der Hitzetage zu, an denen das Thermometer 30 Grad Celsius überschreitet. Das dürfte sich Modellen zufolge vor allem im Südwesten und im Osten Deutschlands in Zukunft verstärkt bemerkbar machen. Auch Stadtbewohner leiden unter der Entwicklung. Der so genannte Wärmeinseleffekt heizt die an Beton und Asphalt reichen Metropolen im Vergleich zum Umland deutlich auf. Um dem gegenzusteuern, setzen Stadtplaner zunehmend auf Maßnahmen für ein verbessertes Mikroklima. Ein Beispiel sind begrünte Fassaden oder Dächer, die durch Verdunstung kühlen und zudem die Starkniederschläge bei Sommergewittern abpuffern, bevor sie die Kanalisation überlasten.

Sicher ist nur die Veränderung

Parallel werden die Winter milder und feuchter. Während die Niederschläge in der kalten Jahreszeit zunehmen, gibt es für die Regenmenge im Sommer noch keinen erkennbaren Trend. Bei Starkregen ist die Datenlage ebenfalls uneindeutig. Er ist oft lokal begrenzt und fällt regelrecht durchs Raster vieler Messstationen, und flächendeckende Radardaten gibt es erst seit zwei Jahrzehnten – zu wenig, um langfristige Entwicklungen zuverlässig abzulesen. Doch Projektionen regionaler Klimamodelle untermauern eine Annahme diverser Forscher: Wärmere Luft bringt vielerorts kräftigere Niederschläge. Nicht nur für die von Sturzfluten betroffenen Anwohner ist das eine schlechte Nachricht, sondern auch für die Pflanzen. Deren Vegetationsperiode hat sich oft bereits um Wochen verlängert. Ihnen wird im Sommer aber zunehmend Wasser fehlen, wenn wärmere Böden schneller austrocknen und dann die intensiveren Regengüsse umso schlechter aufnehmen. Und früh im Jahr schädigen Kälteeinbrüche die vorzeitig gewachsenen jungen Triebe und Blüten.

Bei allen Unsicherheiten im Detail ist klar: In den kommenden Jahrzehnten müssen wir uns auf diverse Veränderungen einstellen. Was das für einige der Regionen und Ökosysteme in Deutschland bedeutet, wie verletzlich sie sind und welche Maßnahmen helfen, mit den Folgen des Klimawandels umzugehen, lesen Sie auf den folgenden Seiten in einer Bestandsaufnahme durch Experten. ◀

LITERATURTIPPS

Brasseur, G. P. et al. (Hg.): Klimawandel in Deutschland. Springer, 2016

Zahlreiche Fachleute stellen den Wissensstand und dessen Grundlagen umfangreich zusammen. Als Open-Access-Publikation frei verfügbar unter: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-50397-3>

Umweltbundesamt (Hg.): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel

Die Übersicht informiert über die Folgen des Klimawandels in verschiedenen Bereichen des gesellschaftlichen Lebens. Als PDF herunterladbar: www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2019

LANDWIRTSCHAFT LEIDTRAGENDE UND MITVERURSACHERIN

Während Klimaextreme wie Starkregen, Hagel oder Hitzewellen direkt Ernteverluste auslösen, wirken manche Folgen der Erwärmung subtiler und langfristiger: Landwirte müssen etwa mit bisher unbekanntem Schädlingen umgehen, alternative Bewässerungsmethoden finden – und teilweise neue Pflanzensorten anbauen.



Die Klimawissenschaftlerin **Diana Rechid** erforscht am Climate Service Center Germany (GERICS) des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, wie sich Landnutzung und Klimawandel gegenseitig beeinflussen.

► [spektrum.de/artikel/1754714](https://www.spektrum.de/artikel/1754714)

Wie sich Temperaturen und Niederschläge im Jahresverlauf verhalten, bestimmt Saat- und Pflanzzeiten, das Wachstum, Erntezeiten und die Zeit der Vegetationsruhe, in der die Pflanzen nicht wachsen. Genauso hängt davon ab, wie viel Wasser verfügbar ist, welche Struktur die Böden aufweisen, wo Schädlinge und Pflanzenkrankheiten auftreten und wie sie sich verbreiten – sowie letztlich Ertrag und Qualität der Ernte. Der Witterungsverlauf schwankt von Jahr zu Jahr, worauf die Landwirtschaft eingestellt ist und sich mit flexiblen Produktionszyklen anpasst. Doch mit fortschreitendem Klimawandel verändern sich Temperaturen und Niederschläge im Jahresverlauf drastischer und werden die Schwankungen teils so stark, dass herkömmliche Produktionsmethoden an ihre Grenzen stoßen. Bereits jetzt treten Hitze- und Trockenperioden, Dauer- und Starkregen vermehrt auf; sie können ganze Ernten vernichten und Landstriche degradieren. Auch in Deutschland sind in den vergangenen Jahren gehäuft meteorologische Extreme aufgetreten, wie etwa die Hitze und Trockenheit in den Jahren 2018 und 2019. Dadurch haben Ackerbaubetriebe vielerorts geringere Ernten eingefahren, beispielsweise bei Weizen, Gerste und Raps. Milchviehbetriebe hatten durch verringertes Wachstum auf Grünland zu wenig eigenes Futter produziert, und die Milchkühe litten unter Hitzestress. Die extreme Trockenheit führte zudem zu erhöhter Winderosion, und in Mittel- und Nordostdeutschland brachen Flächenbrände aus.

Selbst wenn es gelingt, die globale Erwärmung auf höchstens 2 Grad Celsius gegenüber vorindustriellem Niveau zu begrenzen, wie im Pariser Klimaabkommen fest-

gelegt, wird das für die Landwirtschaft in Deutschland bereits weit reichende Auswirkungen haben. Der Sonderbericht des Weltklimarats vom September 2018 zu den Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 Grad zeigt, wie viel kleiner diese ausfallen, verglichen mit einer Erwärmung um 2 Grad, bei der bereits sehr drastische Folgen zu spüren sind. Im Projekt Impact2C haben wir mit rund 80 Expertinnen und Experten aus ganz Europa die zu erwartenden Veränderungen modelliert und herausgearbeitet, was zwei zusätzliche Grad für verschiedene Bereiche wie Landwirtschaft, Wasserhaushalt oder die Wälder in Europa bedeuten. Unter anderem haben wir so abgeschätzt, wie anfällig verschiedene Nutzpflanzen gegenüber einer Erwärmung sind. Weizen – der in Europa fast die Hälfte des erzeugten Getreides ausmacht – hat demnach in Deutschland eine mittlere bis hohe »Vulnerabilität«, würde also unter den neuen Gegebenheiten deutlich schlechter wachsen. Für Gerste ergibt sich ein ähnliches Bild. Landwirte müssen sich daher Gedanken machen, wie sie ihre Felder für die Zukunft fit machen. Dabei könnte eine Überlegung sein, andere Sorten anzubauen, die unter trockeneren und wärmeren Bedingungen besser gedeihen. Darüber hinaus könnten vermehrte und andere Bewässerungsmethoden einen Teil der Lösung darstellen.

Sinkende Grundwasserspiegel gefährden Mensch und Natur

Woher das Wasser dafür stammt, ist eine wesentliche Frage, die sich Landwirte stellen müssen. Bereits während der letzten beiden Dürresommer galt es etwa abzuwägen: Ist es gerechtfertigt, das Wasser aus Grundwasserspeichern oder gar Oberflächengewässern zum Bewässern der Felder zu nutzen? In Niedersachsen, wo sich mit der Heide das hier zu Lande größte zusammenhängende bewässerte Gebiet befindet, sinkt bereits der Grundwasserspiegel. Das gefährdet sowohl bedrohte Arten in den nahe gelegenen seltenen Biotopen als auch die Bevölkerung. Methoden zu finden, die weniger Wasser verbrauchen und es gleichzeitig dorthin transportieren, wo die Pflanze es am dringendsten

benötigt, ist eine der Schlüsselaufgaben für die nächsten Jahre.

Die zunehmende Trockenheit wird aber nicht nur dort, sondern deutschlandweit ein Problem sein. Bereits nach den Dürresommern 2018 und 2019 gab es in vielen Gebieten massive Ernteverluste, teils mussten Landwirte Noternten vor dem optimalen Zeitpunkt einfahren. Und in diesem Jahr waren die Böden im Frühjahr und Frühsommer deutlich weniger feucht als gewöhnlich.

Zusätzlich zur Hitze und Trockenheit werden sich die Witterungsverläufe im Jahresgang weiter verändern. Das bedeutet einerseits deutlich weniger Frostperioden im Winter, was sich nachteilig auf die Vegetationsruhe und Bodenstruktur auswirkt. Zu hohe Temperaturen im Frühsommer wiederum sind ungünstig für das Pflanzenwachstum. Fängt die Vegetation zeitiger an auszutreiben, verdunstet mehr Wasser, wodurch weniger davon im Boden verfügbar ist. Wind und Sonne tun ihr Übriges, um die Gefahr von Trockenschäden zu erhöhen.

Viele Schädlinge profitieren währenddessen von höheren Temperaturen. Das zeigt sich etwa in der Region Altes Land nahe Hamburg, dem größten zusammenhängenden Obstanbaugebiet Nordeuropas. Im Projekt Klimazug-Nord haben wir gemeinsam mit der Obstbauversuchsanstalt Jork der Landwirtschaftskammer Niedersachsen untersucht, wie sich der Klimawandel auf die Region auswirkt. Mit 90 Prozent der Anbaufläche stellt der Apfel dort die mit Abstand wichtigste Obstart dar. Und die warmen Temperaturen spielen dem Apfelwickler (*Cydia pomonella*), einem

Neben der Klimaveränderung selbst machen neuartige Schädlinge den Pflanzen zu schaffen, wie hier auf einer Obstplantage im Alten Land nahe Hamburg.

der größten Obstschädlinge Europas, in die Hände: Dessen Larven wachsen dadurch schneller. So können sie im Spätsommer eine zweite Faltergeneration bilden, die dann die reifenden Früchte befällt. Er ist jedoch bei Weitem nicht der einzige Schädling, dem die Wärme nützt. Ebenso treten unter den veränderten Bedingungen vermehrt Pilze auf, auch solche, die man dort bislang nicht beobachten konnte. Sie befallen die Äpfel und rufen Fäulnis hervor.

Durch die veränderte Niederschlagsverteilung über das Jahr fällt zudem im Winter mehr davon, und zwar auf Grund der zugleich höheren Temperaturen eher als Regen denn als

Warme Temperaturen spielen einem der größten Obstschädlinge Europas in die Hände

Schnee. Das gilt flächendeckend für ganz Deutschland, mit Ausnahme der höheren Lagen in den Alpen. Die dadurch anhaltende Nässe in der kalten Jahreszeit schädigt Pflanzenwurzeln, Fäulnis bildet sich, und Nährstoffe werden ausgewaschen. Das beeinträchtigt Quantität wie Qualität der landwirtschaftlichen Produktion.

Wie können wir all den Veränderungen begegnen? Landwirte sowie Verantwortliche für die langfristige Planung benötigen keine Mittelwerte, sondern präzise Daten, wo sich welche Parameter wann ändern. Im Projekt ADAPTER, das im Frühjahr 2019 gestartet ist, entwickeln wir am Climate Service Center Germany (GERICS) des Helmholtz-Zentrums Geesthacht gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich und Praxispartnern eine Plattform dafür. Zum einen haben wir ein Vorhersagesystem entwickelt, das die aktuellen Daten zu Bodenfeuchte, verfügbarem Wasser, Bodentemperaturen, Sickerwasserraten und anderen Parametern erfasst und auf dieser Grundlage die Entwicklung für die nächsten fünf bis zehn Tage berechnet. Hier unterstützen uns ebenso die Landwirte selbst, indem sie mit Hilfe bereitgestellter Bodensensoren die Werte messen, die dann automatisch an einen Großrechner gesandt werden und die Prognosen verbessern sollen. Für Nordrhein-Westfalen ist die Vorhersage parzellenscharf, das heißt, sie hat eine Auflösung von 300 mal 300 Metern! So können Landwirte sehr genau für die nächsten Tage planen, wann sie welche Sorten aussäen, versorgen, düngen und ernten. Dabei leistet ihr Erfahrungswissen einen wichtigen Beitrag zum Projekt.

Darüber hinaus erstellen wir auf Grundlage regionaler, bis zum Jahr 2100 reichender Klimaprojektionen Informationsmaterialien, die auf verschiedene Akteure in der Praxis zugeschnitten sind. Sie zeigen auf, wie sich die für bestimmte landwirtschaftliche Kulturen relevanten Klimabedingungen in den verschiedenen Boden-Klima-Räumen verändern. Das ist wichtig, um zu entscheiden, ob beispielsweise Beregnungsverfahren umzustellen sind, neue Infrastruktur benötigt wird oder der Boden anders bearbeitet werden muss. Es kann aber ebenso zu der Entscheidung



MIT FOT. GEN. VON ROLAND WEBER, OBSTBAUVERSUCHSANSTALT JORK

führen, Kulturen, die auf lange Sicht nicht gedeihen können, zu ersetzen.

Die landwirtschaftliche Produktion ist einerseits betroffen von den Folgen des Klimawandels und andererseits dessen Mitverursacher durch den Ausstoß von Treibhausgasen wie Lachgas, Methan und Kohlenstoffdioxid. Klimaschutz und Klimaanpassung müssen eng zusammen gedacht werden. Der Sonderbericht des Weltklimarats vom August 2019 zu Klimawandel und Landsystemen zeigt eine Reihe von Maßnahmen auf: So können Landwirte etwa Wasser sparen, indem sie effiziente Beregnungsmethoden einsetzen. Abwechselnde Fruchtfolgen oder Strukturelemente wie Hecken und Blühstreifen erweitern das Spektrum der Pflanzen. Das verringert das Risiko für Ernteausfälle und schützt gleichzeitig vor Schädlingen. Daneben reduzieren sie die Bodenerosion, was sich ebenso durch schützende Bodenbedeckung und schonende Bodenbearbeitung erreichen lässt. Ein Verzicht auf Umpflügen hilft, den Anteil an organischem Material im Boden zu erhöhen. All solche Maßnahmen verringern zum einen die Emissionen. Zum anderen helfen sie, die landwirtschaftliche Produktion an Klimafolgen anzupassen, verbessern die Ernährungssicherheit und vermindern Landdegradierung und Wüstenbildung. Der Bericht zeigt allerdings ebenfalls, dass hier nicht die alleinige Lösung liegen kann. In allen Bereichen unseres Lebens müssen wir hin zu treibhausgasneut-

ralen Kreisläufen. Für eine umfassende gesellschaftliche Transformation verbleiben nur noch wenige Jahre, damit die Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 Grad überhaupt noch im Bereich des Möglichen liegt. ◀

QUELLEN

Belleflamme, A. et al.: Forecasts of plant available and seepage water for agricultural usage during recent extreme hydrometeorological conditions in western Germany using a convection-permitting regional Earth-system model. EGU General Assembly 2020 10.5194/egusphere-egu2020-4704, 2020

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. IPCC, 2019

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. IPCC, 2018

Sieck, K. et al.: Weather extremes over Europe under 1.5°C and 2.0°C global warming from HAPPI regional climate ensemble simulations. Earth System Dynamics 10.5194/esd-2020-4, 2020 (noch nicht erschienen)

FORSTÖKOLOGIE DER GROSSE WALDUMBAU

Durch den Klimawandel sterben nicht nur einzelne Bäume ab. Darüber hinaus ändert sich die Zusammensetzung unserer Wälder grundlegend: Auf weiten Waldflächen werden voraussichtlich nicht mehr die heutigen Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche dominieren.



Andreas Bolte leitet das Thünen-Institut für Waldökosysteme in Eberswalde.

► [spektrum.de/artikel/1752512](https://www.spektrum.de/artikel/1752512)

Die beiden Trockensommer in den Jahren 2018 und 2019 haben bereits gezeigt, wie sich der Klimawandel auf Deutschlands Wälder auswirkt: Auf mehr als 200 000 Hektar Fläche sind Wälder abgestorben und mindestens 100 Millionen Kubikmeter Schadholz angefallen. Nach Schätzungen des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft wird sich dieser Verlust bis Ende 2020

auf über 245 000 Hektar Fläche und mehr als 160 Millionen Kubikmeter Schadholz summieren. Darunter sind nur die Flächen zusammengefasst, die wiederbewaldet werden müssen. Die tatsächliche Schadfläche – einschließlich der Standorte, an denen einzelne Bäume oder Baumgruppen abgestorben sind – ist vermutlich noch erheblich größer.

Die Schäden betreffen derzeit allerdings weniger als fünf Prozent der Waldfläche und des Holzvorrats in unseren Wäldern. Von einem deutschlandweiten »Waldsterben« kann also (noch) keine Rede sein, wenngleich sich in einzelnen Regionen die Waldlandschaften drastisch verändern. Wie wird sich aber eine weitere moderate Klimaerwärmung auf die Wälder in den nächsten 50 Jahren bis 2070 auswirken?

Aller Voraussicht nach werden sich dadurch Witterungs- und Wetterextreme verschärfen und häufiger auftreten.



LYDIA ROSENKRANZ, THÜRINGEN INSTITUT

Die Fichte gehört hier zu Lande zu den größten Verlierern des Klimawandels, denn ihr flaches Wurzelsystem macht sie anfällig gegenüber Trockenheit und für Borkenkäferbefall.

unterschiedlich betroffen. Der größte »Verlierer« des Klimawandels ist unsere momentan häufigste Baumart, die Fichte, die derzeit rund ein Viertel der Waldfläche beansprucht (siehe Foto links). Weil sie ein flaches Wurzelsystem hat, wird sich ihr Lebensraum durch Trockenheit und Borkenkäferbefall einengen. Zukünftig ist die Fichte als dominierende Baumart daher vermutlich nur noch für feuchte und kühle Standorte im höheren Bergland über 600 Meter Meereshöhe geeignet. Dort findet man allerdings weniger als die Hälfte der heutigen Fichtenfläche vor. Die Kiefer, die fast genauso häufig vorkommt (sie besiedelt 23 Prozent der Waldflächen), leidet ebenfalls unter dem zunehmenden Befall durch Schaderreger und Trockenheit. Zwar gilt die Baumart als relativ widerstandsfähig, doch führen die immerwährenden Trockenheiten zu Veränderungen im Holzaufbau. So schafft er es mit der Zeit immer schlechter, genügend Wasser in die Krone zu transportieren, was die Kiefer empfindlich gegenüber Schädlingen macht. Die Bäume in Reinbeständen anzubauen, wird dadurch risikoreicher, und der Kiefernanteil im Tiefland wird voraussichtlich sinken. Die wichtigste Laubbaumart, die Buche (16 Prozent Flächenanteil), kann sich im Bergland künftig auch an Standorten ansiedeln, an denen bislang Fichten dominierten und an denen es bisher zu kühl für sie war. Allerdings verliert sie als trockenheits- und hitzeempfindliche Baumart Standorte im Tiefland und in wärmebegünstigten Hügel- und Talanlagen. Aktuell finden sich in Sachsen-Anhalt, Thüringen und Franken insbesondere auf flachgründigen Muschelkalkstandorten Schäden an Buchen – dort ist die Baumart am stärksten gefährdet. Dennoch rechnen Experten damit, dass sie ihren Flächenanteil durch die Verdrängung der Fichte leicht vergrößern wird.

Besonders Hitzeextreme und Trockenheiten spielen hierbei eine Rolle, doch ebenso Spätfröste, Starkregen und vermutlich Stürme. Höchsttemperaturen über 40 Grad Celsius und aufeinander folgende sommerliche Trockenperioden wie in den beiden letzten Jahren könnten künftig eher die Regel als die Ausnahme sein.

Gleichzeitig werden Vegetationsperioden länger und wärmer ausfallen und sich von April bis in den Oktober hinein erstrecken. Dadurch können sich Schadinsekten wie der Borkenkäfer, holzbrütende und nadel- sowie blattfressende Arten besser ausbreiten. Solche Schädlinge – sowie Schadpilze und -viren – finden dann Bäume vor, die gebietsweise durch Klimaextreme, Schadstoffe und Bodenversauerung schon geschwächt sind, was sie wiederum anfälliger für die Schädlinge macht. Bekannte und bisher wenig beachtete wie beispielsweise der Kleine Buchenborkenkäfer treten auf den Plan, neue Arten dehnen ihre Verbreitung nach Deutschland aus oder werden eingeschleppt. Negative Auswirkungen der Klimaerwärmung werden wir daher in den nächsten Jahren wahrscheinlich weiterhin verstärkt sehen, aber nicht überall im gleichen Ausmaß. In kühleren und feuchteren Regionen, wie in den Hochlagen der Mittelgebirge und der Alpen, begrenzen bisher Kälte und eine kurze Vegetationsperiode das Wachstum. Diese Regionen könnten von einer Erwärmung sogar profitieren, weil die Pflanzen dadurch schneller wachsen und mehr Holz erzeugen (man sagt, der Wald wird »produktiver«).

Der Klimawandel und seine Begleiterscheinungen wirken sich auf alle Baumarten und Waldökosysteme in Deutschland aus. Allerdings sind die verschiedenen Baumarten

Wie die Eiche sich entwickelt, ist unklar

Generell sind bei den Buchenbeständen eher einzelne Baumgruppen abgestorben als Bestände auf großer Fläche. Weil sie jedoch von einem geschlossenem Kronendach abhängig sind, können die Schäden an einzelnen Bäumen oder Baumgruppen einen beginnenden Abbau bedeuten, der sich schrittweise fortsetzt. In Folge der anhaltenden Trockenheit werden die Gewächse im Lauf der Jahre außerdem anfälliger für Buchen-Borkenkäfer. Auch wenn die derzeitigen Schäden etwa bei der Fichte deutlicher zu Tage treten, sollte man die Gefährdung der Buche daher nicht unterschätzen.

Am schwierigsten ist die Lage bei der Trauben- und der Stieleiche zu beurteilen, die momentan etwa ein Zehntel der Waldfläche bewachsen. Sie leiden ebenfalls unter einer Vielzahl von Schaderregern, von denen der allergieauslösende Eichenprozessionsspinner nur einer unter vielen ist. Weil Insekten Wärme liebend sind und sich unter höheren Temperaturen besser ausbreiten können, werden sie durch

den Klimawandel immer vitaler. Allerdings haben die Schäden bei den Eichen in den letzten beiden Trockenjahren weniger zugenommen als bei den anderen Baumarten. Insbesondere die vergleichsweise trockenheits- und hitzetolerante Traubeneiche könnte ihre Flächenanteile halten oder leicht erhöhen. In der Gesamtschau wird trotzdem eine erhebliche Waldfläche in Zukunft voraussichtlich nicht mehr durch die heutigen Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche besetzt werden.

Die letzte Möglichkeit der Walderhaltung ist es, Exoten anzusiedeln

Daher ist es wichtig, die Wälder langfristig an den Klimawandel anzupassen und sich dabei an der aufgezeigten Verschiebung der Lebensräume von Baumarten in den nächsten Jahrzehnten zu orientieren. Das bedeutet einerseits einer natürlichen Waldentwicklung Raum zu geben und andererseits Wälder aktiv anzupassen. Letzteres wird dann notwendig, wenn die Naturverjüngung – also das natürliche Nachwachsen – der bestehenden Hauptbaumart wie beispielsweise der Fichte die Lebensraumveränderung nicht berücksichtigt.

Entwicklungshilfe für die Buche

Zur aktiven Anpassung gehört etwa, reine Fichtenbestände, die sich in gefährdeten Lagen befinden, zu Misch- und Laubwäldern umzubauen. Indem man zuwachsstarke Nadelbaumarten wie Weißtanne, Douglasie oder Küstentanne gemischt mit Laubbäumen pflanzt, lässt sich die Produktivität in den Berglandregionen verbessern. Im Tiefland und in wärmeren unteren Berglandlagen steht zukünftig das Ziel im Vordergrund, die Wälder zu erhalten. Eine wichtige Option ist dabei zum einen die Assisted Migration: Hierbei verwendet man gezielt Saat- und Pflanzgut toleranter Baumbestände aus den trocken-warmen Randbereichen des Verbreitungsgebiets unserer heutigen Hauptbaumarten. Dabei geht es nicht darum, die heimischen Bestände durch eingeführte zu ersetzen, sondern die toleranten Varianten mit den hiesigen zu mischen. Langfristig können sie so die Anpassung an die nächste Baumgeneration weitergeben. Im Fall der Buche haben wir am Thünen-Institut für Waldökologie mit diesem Ansatz in den letzten Jahren bereits viel versprechende Ergebnisse erzielt. Er hat den klaren Vorteil, dass keine neuen Arten eingeführt, sondern bestehende erweitert werden. Und gerade für die Buche, die als Schattbaumart einzigartige Eigenschaften besitzt und die es daher so lange wie möglich als Komponente gegen den Klimawandel in unseren Wäldern zu erhalten gilt, besteht hier eine große Chance.

Zum anderen könnte man verstärkt bisherige Nebenbaumarten wie Esskastanie, Elsbeere oder Winterlinde pflanzen sowie frostharte Baumarten, die in Südeuropa verbreitet sind, wie die Orientbuche oder die Ungarische

Eiche. Die letzte Möglichkeit der Walderhaltung ist es, Exoten aus trocken-warmen Klimazonen anderer Kontinente anzusiedeln. Dafür ist ein forstliches Versuchswesen notwendig, das untersucht, welche Baumarten sich dafür am ehesten eignen und wie die Ökosysteme am besten gemanagt werden. Zusätzlich sind Netzwerke zwischen Forschung und Praxis mit umfangreichen Anbauversuchen gefragt, um neue Erkenntnisse rasch zwischen Wissenschaft und Anwendung auszutauschen.

Solche Versuche benötigen allerdings lange Zeit, weil wichtige Trends oft erst nach Jahrzehnten zu erkennen sind. Bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts hinein galt beispielsweise die Weimutskiefer oder Strobe als Hoffnungsträger – bis sich herausstellte, dass sie überall dort, wo sie gemeinsam mit der Johanniskiefer und Stachelbeere auftritt, von Blasenrost befallen wird, der massive Schäden verursacht. Daher ist es wichtig, viele Kandidaten über eine lange Zeit hinweg zu beobachten.

Derzeit koordinieren die Bundesländer eigenständig forstliche Versuche. Darunter finden sich zahlreiche interessante Beispiele; die Experimente lassen sich aber häufig nur schwer über Ländergrenzen hinweg vergleichen. Um bewerten zu können, welche Baumarten für welche Regionen geeignet sind, bedarf es außerdem großflächiger Untersuchungen – denn die jeweiligen Verbreitungsgebiete erstrecken sich über große Teile Europas. Ein bedeutendes Ziel ist es deshalb, ein deutschlandweites oder sogar internationales Versuchswesen aufzubauen, um ein vollständiges Bild zu erhalten. Neben dem Wissenschaftsnetzwerk der Forsteinrichtungen ist es wichtig, private Waldbesitzer einzubeziehen, die in Deutschland rund die Hälfte der Waldfläche bewirtschaften und deren Gebiete oft nur einige wenige Hektar umfassen. Ihre Initiative und Interesse in ein deutschlandweites Versuchswesen einzubinden, wäre ein großer Gewinn. Darüber hinaus wollen wir gemeinsam mit Kollegen aus Österreich, der Schweiz und einigen deutschen Bundesländern ein Verfahren entwickeln, um Waldschäden für ganz Deutschland per Fernerkundung zu erfassen. Die Daten sollen zum einen Auskunft über deren Größenordnung geben, zum anderen über das veränderte Holzvolumen und die wirtschaftliche Dimension der Waldschäden. ◀

QUELLEN

Bolte, A. et al.: Desiccation and mortality dynamics in seedlings of different European beech (*Fagus sylvatica* L.) populations under extreme drought conditions. *Frontiers in Plant Science* 7, 2016

Bose, A. et al.: Growth and resilience responses of Scots pine to extreme droughts across Europe depend on predrought growth conditions. *Global Change Biology* 10.1111/gcb.15153, 2020 (noch nicht erschienen)

Cocozza, C. et al.: Variation in ecophysiological traits and drought tolerance of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings from different populations. *Frontiers in Plant Science* 7, 2016

Stojnic, S. et al.: Variation in xylem vulnerability to embolism in European beech from geographically marginal populations. *Tree Physiology* 38, 2018

MEERE KÜSTEN UNTER DRUCK

Der steigende Meeresspiegel macht Sturmfluten bedrohlicher. Doch höhere Deiche sind nur ein Teil der Lösung. Deutschlands Küstengebiete brauchen umfassende Schutzkonzepte.

JONAS GROSS



Ralf Weisse leitet die Abteilung Küstenklima des Instituts für Küstenforschung am Helmholtz-Zentrum Geesthacht.

► spektrum.de/artikel/1752514

► Mit Küste verbinden viele von uns vor allem Vorstellungen von Sand und Meer, von unberührter Natur, Ruhe und Entspannung. Den wenigsten ist bewusst: Die Gebiete sind oft stark genutzt und vielfach auch dicht besiedelt. Küsten sind wichtige Transportwege, Industriestandorte und Ballungsräume – ein dynamischer Lebensraum, geprägt vom Menschen und von sich ändernden Umweltbedingungen.

Die deutschen Küsten an Nord- und Ostsee sind etwa 3700 Kilometer lang. Den Klimawandel werden die Menschen dort in erster Linie durch den steigenden Meeresspiegel zu spüren bekommen. Weltweit hat dieser sich in

den vergangenen etwa 100 bis 120 Jahren um etwa 20 Zentimeter angehoben. Ein Großteil der relativ flachen deutschen Küstenregionen liegt nur knapp oberhalb des mittleren Meeresspiegels, viele sogar unterhalb. Solche Gebiete gelten als überflutungsgefährdet und werden durch eine an der Nordseeküste fast durchgehende Deichlinie vor Sturmfluten geschützt.

Obwohl sich die Sturmaktivität in den letzten 100 Jahren nicht wesentlich verändert hat, laufen die Sturmfluten bei uns inzwischen teils höher auf. Wegen des gestiegenen Meeresspiegels starten sie heute von einem anderen Ausgangsniveau. Das ist wie bei einem plantschenden Kind in der Badewanne: Je voller sie ist, desto weniger muss es zappeln, um sie zum Überlaufen zu bringen.

Wie sich die Sturmfluten an den deutschen Küsten in Zukunft entwickeln, hängt wesentlich von zwei Faktoren

Deiche sind ein typisches Bild an deutschen Küsten. Oft trennen allein diese Bauwerke die dortigen Siedlungen von den Gewalten des Meeres.

EMERT/940 / GETTY IMAGES / ISTOCK



Karten und Daten im Internet

Die von uns entwickelte Internetseite www.kuestenschutzbedarf.de liefert ein Bild von der Größe der überflutungsgefährdeten Gebiete – und wie sie sich infolge eines Meeresspiegelanstiegs verändern werden.

Ob und inwieweit eine bei uns aufgetretene Sturmflut bereits ungewöhnlich ist, kann mit unserem Tool auf www.sturmflutmonitor.de tagesaktuell verfolgt werden. Dort zeigen wir, wie sich das Sturmflutgeschehen in den letzten Jahrzehnten entwickelt hat und ob aktuelle Ereignisse oder der Verlauf der jetzigen Saison ungewöhnlich im Vergleich zu früher sind. Dazu werten wir die von den zuständigen Behörden erhobenen Pegelmessungen aus und setzen die Daten in Bezug zu von uns erstellten langfristigen Statistiken.

ab. Zum einen können sich systematische Veränderungen im Sturmklima auf die Intensitäten oder Häufigkeiten von Sturmfluten auswirken. Im Moment gehen wir nach unseren Erkenntnissen davon aus, dass sich die Sturmaktivität an der deutschen Nord- und Ostseeküste in den nächsten Jahrzehnten nicht wesentlich von der heutigen unterscheiden wird. Zum anderen wird der weitere Anstieg des Meeresspiegels langfristig die Situation verschärfen. Dieser ist absehbar – unklar ist hier lediglich das zu erwartende Ausmaß. Es wird unter anderem davon abhängen, wie viel Treibhausgase wir in Zukunft emittieren und wie sich die großen Eisschilde in Grönland und der Antarktis verhalten. Je nachdem, welche Annahmen man hier zu Grunde legt, kommt der letzte Sonderbericht des Weltklimarats auf Zahlen von 30 Zentimeter bis etwa 1,1 Meter zum Ende des Jahrhunderts.

Ein großes Portfolio an Schutzmaßnahmen – doch welche sind die jeweils besten?

Im Küstenschutz tragen die Planer dieser Ungewissheit derzeit Rechnung, indem sie in der Deichbemessung etwa einen zukünftigen Meeresspiegelanstieg von 50 Zentimeter bereits berücksichtigen. Hinzu kommen breitere Kronen und Querschnitte und abgeflachte Böschungen, so dass sich die Deiche später relativ einfach weiter erhöhen lassen. Diese so genannten Klimadeiche findet man schon zum Beispiel in Büsum, Nordstrand oder Dagebüll. Das Prinzip soll möglichst bei jedem Deich umgesetzt werden, der in den nächsten Jahren verstärkt wird. Deiche sind aber nur Teil eines wesentlich umfangreicheren Portfolios an Küstenschutzmaßnahmen. Dazu gehören unter anderem Sturmflutsperrwerke wie in der Ems oder der Eider, Warftenkonzepte wie in der Hamburger Hafencity oder Dünen und Sandvorspülungen wie auf Sylt.

Neben dem Meeresspiegelanstieg ist ein weiteres Problem allgemein weniger bekannt: Die niedrig gelegenen

Gebiete müssen permanent entwässert werden. Das geschieht über ein System von verschließbaren Deichdurchlässen (Sielen), Schleusen und Pumpen (Schöpfwerken). Doch über Siele kann überschüssiges Wasser nur abgeführt werden, wenn der seeseitige Wasserstand unter dem binnenseitigen liegt. Bei einem zunehmend höheren Meeresspiegel werden die Zeitfenster für das Ablassen kontinuierlich kürzer. Das erhöht den Bedarf an möglichst ausfallsicherer und damit teurer Pumpleistung. Außerdem könnte es durch den Klimawandel mehr Starkregenereignisse mit sehr viel Niederschlag in kurzer Zeit geben. Das würde die Systeme zusätzlich belasten. Regionen wie die Insel Pellworm oder die Knock nordwestlich von Emden sind bereits heute davon betroffen. Um die Entwässerung in diesen Regionen zukunftsfähig zu gestalten, gab und gibt es eine Reihe von Forschungsprojekten, in denen sich Kollegen Gedanken darüber machen, welche Maßnahmen möglich und nötig sowie gesellschaftlich akzeptiert wären. Solche Überlegungen betreffen leistungsfähigere Siele und Schöpfwerke ebenso wie die Schaffung und Steuerung von Rückhalte- und Speicherkapazitäten, die Verbesserung von Gefahrenabwehr und Katastrophenschutz und mehr.

Alle genannten Faktoren wie steigende Meeresspiegel, häufigere Starkregenereignisse oder veränderte Sturmfluthäufigkeiten können sich gegenseitig beeinflussen und verstärken. Zudem sind bei praktischen Entscheidungen die betrachteten Zeiträume und Kriterien oft ganz verschieden. Darum stellen wir uns nun in einem im Juni 2020 begonnenen und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojekt die Frage, wie ein umfassendes Konzept zum Küstenschutz aussehen könnte. Es soll alle Perspektiven vereinen und gegen eindringendes Meerwasser und Erosion wirken, die Entwässerung gewährleisten und das Grund- und Oberflächenwasser auf dem Festland und den Inseln vor Versalzung bewahren. Wir wollen herausfinden, welche Informationen und Lösungsansätze die Betroffenen brauchen, um sich auf die Klimaentwicklungen aktiv vorzubereiten und ortsspezifisch einzustellen – nicht nur langfristig bis zum Ende des Jahrhunderts, sondern auch auf kürzere Zeit. ◀

QUELLEN

Bormann, H. et al: Adaptation of water management to regional climate change in a coastal region – Hydrological change vs. community perception and strategies. *Journal of Hydrology* 454–455, 2012

Horsburgh, K. et al: Hydrological risk: Wave action, storm surge and coastal flooding. In: Poljanšek, K. (Hg.): *Science for disaster risk management 2017: Knowing better and losing less*. Publications Office of the European Union, 2017, S. 219–227

Huthnance, J. et al: Recent change – North Sea. In: Quante, M., Colijn, F. (Hg.): *North Sea region climate change assessment*. Springer, 2016, S. 85–136

Krueger, O. et al.: Northeast Atlantic storm activity and its uncertainty from the late nineteenth to the twenty-first century. *Journal of Climate* 32, 2019

Weisse, R., Hünicke, B.: *Baltic Sea level. Past, present, and future*. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science. Oxford University Press, 2019

BINNENGEWÄSSER SCHLAGLICHT AUF SEEN UND FLÜSSE

Das Zusammenspiel von Temperaturen und Wetterextremen im Lauf der Jahreszeiten beeinflusst die ökologischen Zusammenhänge in Binnengewässern auf komplexe Weise. Entsprechend vielfältig wirkt sich hier der Klimawandel aus.



Rita Adrian lehrt Gewässerökologie an der Freien Universität Berlin und leitet die Abteilung für Ökosystemforschung am Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei in Berlin (IGB). Sie ist eine Hauptautorin des sechsten Sachstandsberichts des Weltklimarats IPCC. **Benjamin M. Kraemer** erforscht am IGB die globalen Folgen des Klimawandels für Seeökosysteme und trägt ebenfalls zum IPCC-Bericht bei.

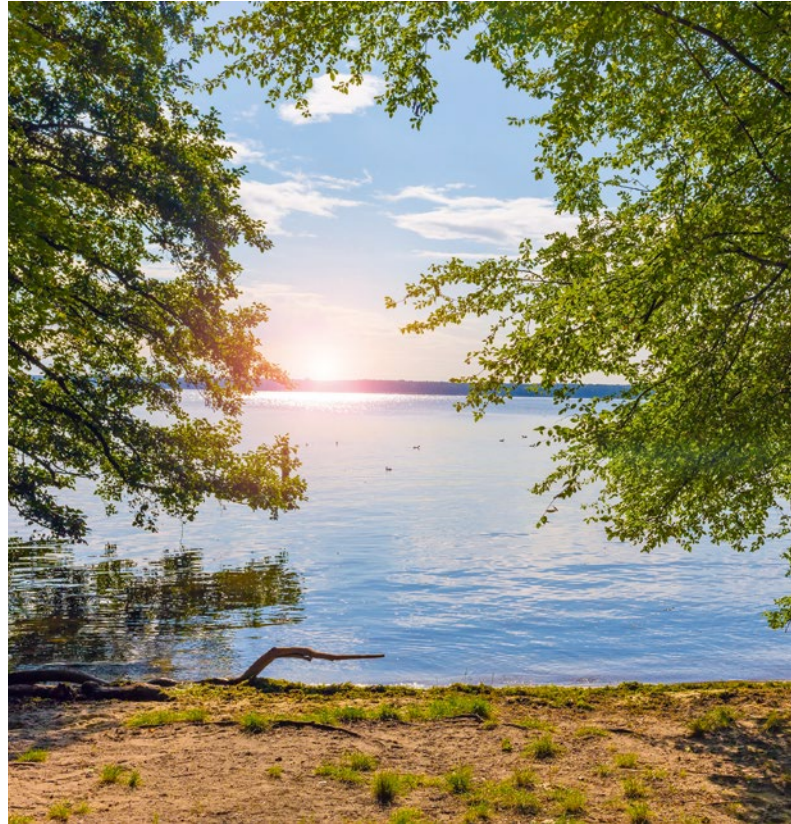
» spektrum.de/artikel/1752516

▶ Seen haben nicht nur einen hohen Freizeitwert, sie sichern zudem einen Teil der Trinkwasserversorgung und damit unserer Lebensgrundlage. Beim Klimawandel spielen Binnengewässer ebenfalls eine große Rolle: Sie reichern zusammen genommen mehr Kohlenstoff in ihren Sedimenten an als der Grund sämtlicher Ozeane.

In den vergangenen Jahrzehnten hat die globale Erwärmung die Seen und Flüsse bereits stark verändert. Denn die Temperatur beeinflusst dort direkt oder indirekt alle wesentlichen Prozesse, ob physikochemisch oder biologisch. Im globalen Mittel sind ihre sommerlichen Oberflächentemperaturen in den vergangenen 30 bis 40 Jahren pro Dekade um etwa ein Drittel Grad Celsius angestiegen. In der gemäßigten Zone auf der Nordhalbkugel hat sich zugleich die Dauer, während der Seen von Eis bedeckt sind, um mehr als zwei Wochen verkürzt. Beispielsweise werden beim Berliner Müggelsee bis zum Ende des Jahrhunderts voraussichtlich Bedingungen herrschen, als wäre er geografisch um etwa 800 Kilometer nach Süden verschoben worden, also wie heute in Norditalien.

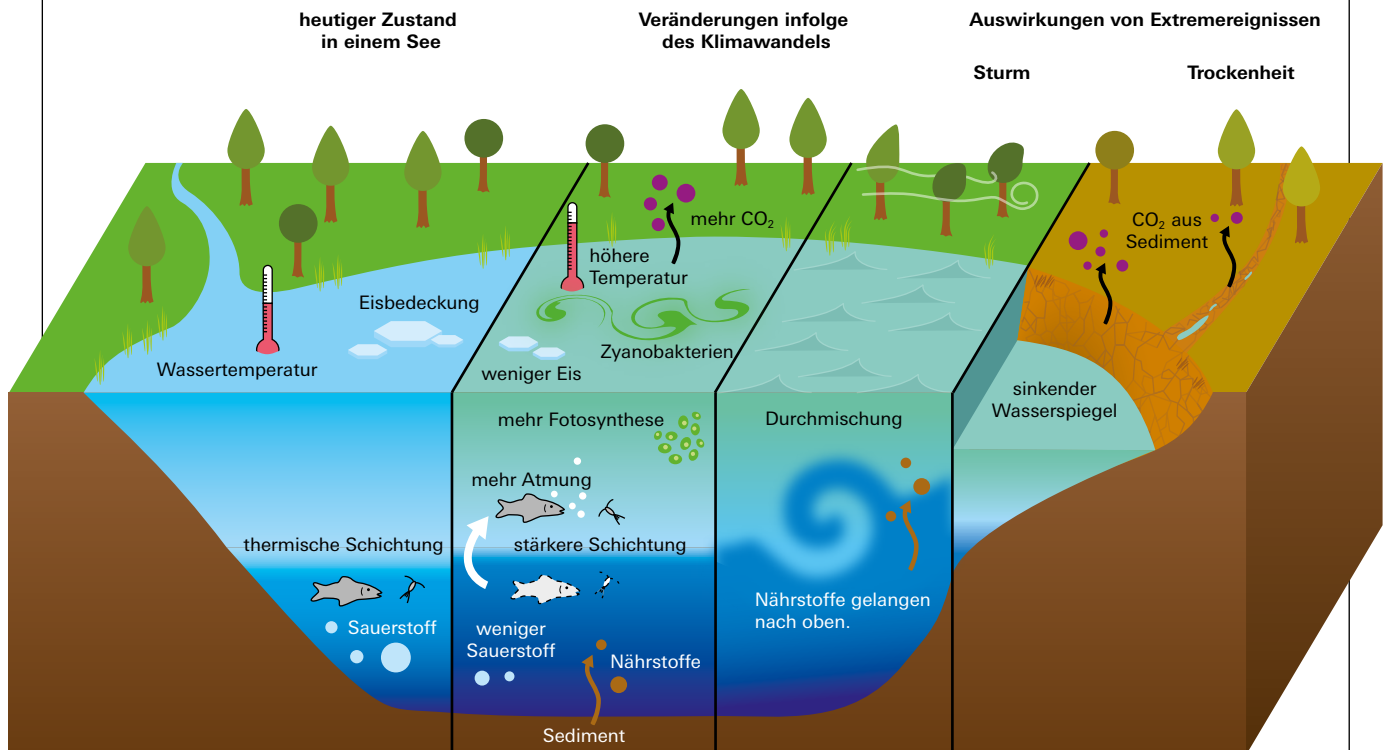
Besonders deutlich wirkt sich der Klimawandel auf die thermische Schichtung von Seen aus. Im Frühjahr wärmt sich Oberflächenwasser schneller auf als tiefer gelegene Bereiche. Das erzeugt eine Barriere für den Austausch von Sauerstoff und Nährstoffen zwischen oben und unten (siehe »Wie Seen sich verändern«, S. 24). Der Zustand bleibt in der Regel während des gesamten Sommers erhalten und setzt durch mildere Winter und höhere Frühjahrstemperaturen in Seen der gemäßigten Zone inzwischen zwei bis drei Wochen früher im Jahr ein. Zudem dauert er im Herbst länger an.

MAURICE TRICHELLE / ISTOCK ADREBE.COM



Um die komplizierten Vorgänge unter der idyllischen Wasseroberfläche zu verfolgen, erfassen Experten regelmäßig umfangreiche Messdaten.

Wie Seen sich verändern



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS, ILMICH, RITA ADRIAN UND BENJAMIN M. KRAEMER

Bei zunehmender Erwärmung laufen verschiedene Prozesse in einem See anders ab. Die Dauer und Dicke der Eisbedeckung verringert sich; die Wassertemperaturen nehmen zu, ebenso Photosynthese und Atmung. Der Sauerstoffgehalt sinkt und Wasserspiegel

ändern sich. Die thermische Schichtung zwischen warmen oberen und kälteren unteren Bereichen (Thermokline) dauert länger an. Durch erhöhte Wassertemperaturen und trockenfallende Ufer fungieren Seen und Flüsse für die Atmosphäre zunehmend als CO₂-Quellen.

Sauerstofffreie Zonen im Tiefenwasser reduzieren das Habitat für Fische und Zooplankton und befördern das Freisetzen von Nährstoffen aus dem Sediment. Starke Stürme verschieben die Thermokline, und Nährstoffe gelangen nach oben.

Mit der Wärme steigt die Menge an Algen, die während ihrer Photosynthese in den oberen Wasserbereichen Sauerstoff freisetzen. Die erhöhten Temperaturen verstärken zugleich jedoch die mikrobielle Atmung, die Sauerstoff im Wasser verbraucht – auch in der Tiefe. Die thermische Schichtung verhindert allerdings, dass neuer Sauerstoff in die unteren Wasserregionen gelangt. So verschärft der Klimawandel die Entwicklung sauerstofffreier Tiefwasserzonen in Seen. Das verkleinert die Lebensräume für Organismen wie Zooplankton und Fische, die nach oben ausweichen müssen. Dort sind sie aber mehr thermischem Stress und größerer Gefahr ausgesetzt, gefressen zu werden. Bei Sauerstoffarmut lösen sich außerdem Nährstoffe aus dem Sediment. Das entspricht einer zunehmenden internen Düngung von Seen, von der vor allem Zyanobakterien profitieren, auch als Blaualgenblüten berüchtigt.

In tiefen, nährstoffarmen Seen kann die längere thermische Schichtung allerdings einen gegenteiligen Effekt

haben. Hier ist Tiefenwasser oftmals die einzige Nährstoffquelle. Sie steht in den oberen, lichtdurchfluteten Wasserschichten nun über längere Perioden im Sommer bis in den Herbst nicht mehr zur Verfügung. Stürme können diese Begrenzung kurzzeitig aufheben. Sie durchmischen die beiden Wasserkörper teilweise und bringen somit episodisch Nährstoffe nach oben.

Automatische Messstationen, wie sie im Berliner Müggelsee und an weiteren Seen der Welt betrieben werden, ermöglichen es, die Auswirkungen kurzzeitiger Extreme in Echtzeit zu erfassen. Das erlaubt Studien, ob und wie schnell Seen auf solche Störungen reagieren – Forscher sprechen von Resistenz, also der Widerstandsfähigkeit – und von Resilienz, der Fähigkeit wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurückzukehren. Stürme oder Hitze treffen Binnengewässer während unterschiedlicher Ausgangsbedingungen. Um Resistenz und Resilienz zu modellieren, gilt es, ein komplexes Zusammenspiel zu entflechten: einerseits

zwischen der Stärke, Dauer und Frequenz der Wetterbedingungen und andererseits dem mehr oder weniger empfindlichen Zustand, in dem sich das Ökosystem anfangs befindet. Flache, windexponierte Seen wie der Berliner Müggelsee reagieren in der Regel unmittelbar auf Extreme (geringe Resistenz), kehren aber meist rasch wieder in einen ähnlichen Zustand zurück (hohe Resilienz).

Treibhausmotor Trockenheit

Schon heute geben Binnengewässer CO₂ in die Atmosphäre ab, und mit zunehmender globaler Erwärmung werden sie netto mehr Treibhausgase freisetzen. Denn zum einen wirkt sich die Atmung, bei der CO₂ freigesetzt wird, bei steigenden Temperaturen stärker aus als die Absorption von CO₂ durch Fotosynthese. Zum anderen fallen durch Hitze oder lang anhaltende Dürrephasen Flusssedimente oder Seeufer trocken. Dann werden sie zu CO₂-Quellen, denn Luftsauerstoff verstärkt den mikrobiellen Abbau organischen Materials. Messungen konnten derart erhöhte Treibhausgasemissionen in Deutschland beispielsweise für die Elbe im Hitzesommer 2018 bestätigen. Konservativen Modell-Abschätzungen zufolge werden die Emissionen aus Binnengewässern allein durch Hitzeextreme um etwa zehn Prozent zunehmen. Wegen solcher Wetterlagen werden in Deutschland in Zukunft selbst größere Flüsse häufiger teilweise trockenfallen. Derzeit versuchen Forscher, die Größenordnung dieser bis dato unterschätzten Emissionen von Treibhausgasen zu bestimmen.

Wetter und Klima beeinflussen direkt und indirekt eine Vielzahl von miteinander verflochtenen Variablen auf ver-

schiedenen Zeitskalen. Das erschwert es, die volle Komplexität der Reaktionen von Binnengewässern zu modellieren und Vorhersagen zu treffen. Hinzu kommen Faktoren wie die Landnutzung. Langzeitstudien, verbesserte Fernerkundungsdaten und neu angepasste Modelle sollten aber die Prognosen darüber verbessern, welchen Herausforderungen unsere Binnengewässer zukünftig ausgesetzt sein werden. ◀

QUELLEN

Adrian, R. et al.: 2016. Environmental impacts – lake ecosystems. In: Quante, M., Colijn, F. (Hg.): North Sea region climate change assessment. Springer, 2016, S. 315–340

Keller, P.S. et al.: Global CO₂ emissions from dry inland waters share common drivers across ecosystems. Nature Communications 11, 2020

Marce, R. et al.: Emissions from dry inland waters are a blind spot in the global carbon cycle. Earth-Science Reviews 188, 2019

O'Reilly, C. et al.: Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. Geophysical Research Letters 42, 2015

WEBLINK

Messstation Müggelsee

www.igb-berlin.de/messstation-mueggelsee

Die Daten aus dem Langzeitforschungsprogramm des IGB und der automatischen Messstation im Berliner Müggelsee gehören zu den weltweit besten Zeitreihen, mit denen sich die ökologischen Folgen des Klimawandels für Seen dokumentieren lassen.

Spektrum PLUS⁺

Ihre Vorteile als Abonnent

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

- ▶ Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**
- ▶ Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von Partnern zum Vorteilspreis
- ▶ **Digitales Produkt** zum kostenlosen Download und weitere Vorteile:
 - Download des Monats im August: Spektrum Kompakt »Tiere on Tour«
 - Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen
 - Reduzierte Digitalpakete »Exoplaneten«, »Frauen« sowie »Drogen«

Weitere Informationen und Anmeldung:
Spektrum.de/plus

AGUADA FÉNIX DIE GEBURTSTUNDE DER MAYA

Schon lange rätseln Archäologen, wo, wie und wann die Maya-Kultur entstanden ist. Nun haben sie in Tabasco, Mexiko, den ältesten bekannten Bau der Maya entdeckt – und gleichzeitig den größten.

► Vermutlich waren es ausgedehnte Dürren verquickt mit sozialen Umwälzungen und Kriegen, die für den Untergang der klassischen Maya-Stadtstaaten zwischen 800 und 1000 n. Chr. sorgten. Der Beginn der Maya-Kultur liegt dagegen noch weitgehend im Dunklen. Im Südosten Mexikos sind Archäologen nun auf bislang unbekannte Stätten gestoßen, die zeigen, wann, wo und wie die frühen Mesoamerikaner den Grundstein für ihre Kultur legten. Forscher um Takeshi Inomata von der University of Arizona haben in der Region Tabasco die bislang älteste Großanlage der Maya ausfindig gemacht. Sie entdeckten in Aguada Fénix ein aufgeschüttetes Erdplateau mit einem für die Maya typischen Zeremonialbau.

Wie die Archäologen in »Nature« beschreiben, handelt es sich zudem um die größte frühzeitliche Anlage dieser mittelamerikanischen Zivilisation. Inomata und seine Kollegen gehen davon aus, dass die Menschen von Aguada Fénix vor rund 3000 Jahren in einer gemeinschaftlichen Anstrengung eine monumentale meterhohe Plattform und Rampen aufgeschüttet haben. Den Anstoß für das 200 Jahre währende Mammutprojekt hätten sie von den benachbarten Olmeken bekommen – eine ungefähr zeitgleiche, von Eliten angeführte Kultur, die herrschaftliche Bauten und kolossale Skulpturen hinterließ.

Im dichten Regenwald der Yucatán-Halbinsel und der angrenzenden Landbrücke zwischen Pazifik und Atlantik erstreckten sich einst Dutzende Stadtstaaten der Maya. Ihre Herrscher ließen im 1. Jahrtausend n. Chr. weitläufige Zentren errichten. Von der einstigen Pracht zeugen heute noch berühmte Stätten wie Tikal in Guatemala, Calakmul oder Palenque in Mexiko: mächtige Stufenpyramiden,

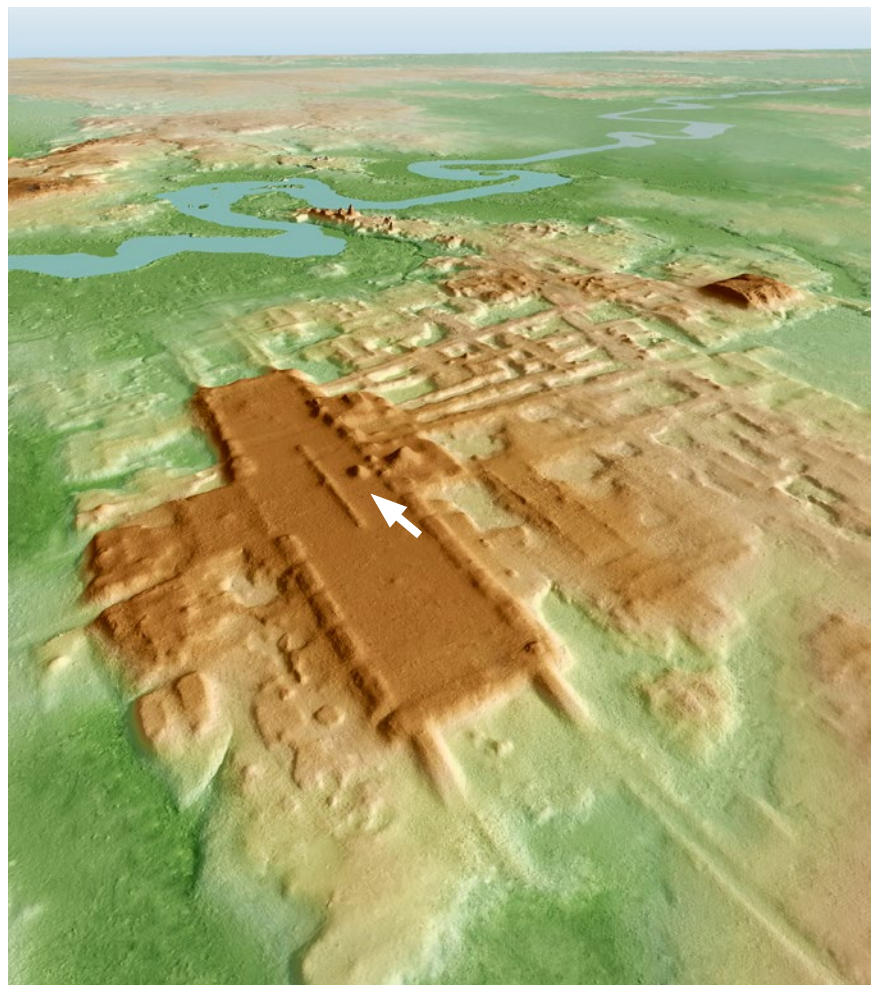
ausgedehnte Platzanlagen, mit Treppen gesäumte Ballspielplätze und befestigte Straßen. Hunderte Fundorte haben Archäologen im einstigen Maya-Tiefeland dokumentiert, das heute den Südosten von Mexiko, die Staatsgebiete von Belize und Guatemala sowie die westlichen Regionen von El Salvador und Honduras umfasst.

Archäologen rätseln schon länger darüber, wie die Maya-Kultur entstanden ist. Manche gehen davon aus, dass einfache Dörfer allmählich zwi-

schen 1000 und 350 v. Chr. zu großen Zentren heranwuchsen. Die Menschen hätten in jener Phase nicht nur damit begonnen, Keramik herzustellen, sondern seien auch sesshaft geworden. Dieser These steht die Vorstellung anderer Experten gegenüber, dass die frühen Maya sehr viel früher und rascher ihre Lebensweise und ihre Umgebung veränderten. Entsprechende Impulse hätten sie sich bei den Olmeken geholt, die an Orten wie San Lorenzo bereits zwischen 1400 und 1150 v. Chr. plateauartige Großbauten errichtet hatten. Dort, in der Region Veracruz im Südosten Mexikos, markierten die Herrscher ihren Machtanspruch zudem mit kolossalen Skulpturen ihrer Köpfe.

Um letzterer Annahme nachzugehen, rief Takeshi Inomata 2017 das »Middle Usumacinta Archaeological

Basierend auf Laserscans haben Archäologen um Takeshi Inomata von der University of Arizona eine 3-D-Rekonstruktion der frühen Maya-Anlage erstellt. Im Zentrum der rechteckigen Plattform (dunkelbraun) lokalisierten sie eine zeremonielle »E-Gruppe«, hier als schmale Linie mit Punkt sichtbar (Pfeil).



TAKESHI INOMATA, UNIVERSITY OF ARIZONA



Das Maya-Tiefeland (dunkelgrau) erstreckte sich über den heutigen Südosten von Mexiko, über Belize, Guatemala und den Westen von El Salvador und Honduras.

Project« ins Leben. Die Idee dahinter: die Grenzregion zwischen den Olmeken und dem Maya-Tiefeland genauer zu erkunden. Heute befindet sich das Gebiet in Mexiko nahe der Grenze zu Guatemala an den Flüssen Usumacinta und San Pedro. Dass die Forscher hier fündig werden könnten, legten Scans nahe, die auf der Lidar-Technik (kurz für light detection and ranging) beruhen. Von einem Hubschrauber oder einer Drohne aus sendet dafür ein Lasergerät alle paar Sekunden Millionen Laserpulse aus. Zwar prallen die meisten Strahlen an der Vegetation ab, doch durchdringen genügend das Blätterdach bis zum Boden. Aus den Reflexionen dieser Lichtblitze erstellt das Gerät ein topografisches Profil – und macht etwaige überwucherte Strukturen sichtbar.

Zeremonialarchitektur der Maya

»Auf niedrig aufgelösten Lidar-Aufnahmen, welche die mexikanische Regierung gesammelt hatte, haben wir diese riesige Plattform bemerkt«, sagt Takeshi Inomata laut einer Pressemitteilung der University of Arizona. »Daraufhin haben wir unsererseits hoch aufgelöste Aufnahmen angefertigt, die dann die Existenz eines großen Baus bestätigten.« Dieser entpuppte sich als 1413 Meter lange und 399 Meter breite Plattform, deren Längsseite auf einer Nord-Süd-Achse verläuft. Um das Plateau anzulegen,

hatten die Maya einen zirka 10 bis 15 Meter hohen Block aus Erde und Lehm auf einer natürlichen Felsenanhöhe aufgehäuft.

Dass an dieser Stelle, in Aguada Fénix, eine Stätte der Maya schlummerte, war bis dahin unbekannt. »Das Gebiet ist erschlossen, es ist kein Dschungel, Menschen leben dort – aber niemand kannte die Stätte, weil sie so flach und riesig ist. Es sieht aus wie natürliche Landschaft«, sagt Inomata. Die Lidar-Aufnahmen zeigten zudem, dass die Plattform von weiteren, kleineren Anlagen und künstlich angelegten Teichen umgeben ist. Straßen, von denen sich die längste über eine Strecke von 6,3 Kilometern nachvollziehen lässt, verbinden die Bauten und führen über neun Rampen auf das große Plateau.

Im Umfeld von Aguada Fénix haben die Archäologen insgesamt 21 solcher Komplexe per Laserscan entdeckt, die allerdings kleinere Ausmaße aufweisen. Wie Inomata und sein Team beschreiben, liegt allen Fundorten derselbe Bauplan zu Grunde: eine rechteckige Anlage entlang einer Nord-Süd-Achse, in deren Zentrum sich eine für die Maya typische Zeremonialarchitektur erhebt – eine so genannte E-Gruppe, benannt nach dem Erstfund in Uaxactún in Guatemala. Sie besteht normalerweise aus einer westlichen Pyramide und drei gegenüberliegenden Pyramiden

beziehungsweise einer Plattform in Nord-Süd-Richtung. »E-Gruppen sind die früheste Form von Architektur im Maya-Tiefeland, die nicht zu Wohnzwecken errichtet wurde. Sie dienten astronomischen Beobachtungen mit dem bloßen Auge«, erklärt die Archäologin Patricia A. McAnany von der University of North Carolina at Chapel Hill in einem Begleitkommentar zur »Nature«-Studie. Eine solche gut 400 Meter lange E-Gruppe zeichnet sich auch auf dem Plateau von Aguada Fénix ab.

Nachdem Inomata und sein Team den Ort ausfindig gemacht hatten, machten sie sich daran, das Alter der Anlage zu klären. Dazu legten sie mehrere Grabungsschnitte an – auf dem großen Plateau, in den Straßen und umgebenden Strukturen – und nahmen 69 Holzkohleproben, die sie anschließend mit Hilfe der C-14-Methode datierten. Das Ergebnis: Die Konstruktion aus Lehm und Erde war um 1000 v. Chr. begonnen und 200 Jahre später vollendet worden. Allerdings zeugen tiefer liegende Kulturschichten davon, dass bereits zwischen 1250 und 1050 v. Chr. Menschen in Aguada Fénix lebten. Um 750 v. Chr. hat man den Ort dann verlassen.

In Aguada Fénix existierten offenbar keine sozialen Eliten

Für die These von der allmählichen Entstehung der Maya im Lauf des 1. Jahrtausends v. Chr. spricht demnach nur noch wenig. »Es handelt sich um faszinierende Entdeckungen, die unser Bild von den Anfängen der Maya-Kultur revolutionieren«, sagt Nikolai Grube. Der Altamerikanist und Archäologe von der Universität Bonn ist auf die Maya-Kultur spezialisiert und war nicht an der Studie von Inomata beteiligt. Grube betont zudem, dass mit Aguada Fénix nun erstmals konkrete Belege für die frühe Architektur vorliegen. »Wir sehen hier möglicherweise die Geburtsstunde der Maya-Kultur.«



STOCKCAM / GETTY IMAGES / ISTOCK

Diese Skulptur eines Kopfes kam in der Olmeken-Stätte La Venta ans Licht. Die Basaltplastik ist rund zweieinhalb Meter groß. Forscher vermuten, dass es sich um das Bildnis eines Herrschers handelt.

Die mesoamerikanischen Erbauer hatten sich dafür die entsprechende Inspiration bei den benachbarten Olmeken geholt. Aus Zentren wie San Lorenzo sind ebenfalls monumentale Plateauanlagen bekannt, die schon einige Jahrhunderte zuvor in Gebrauch waren und als Kultorte dienten. »Offenbar übernahmen die Erbauer von Aguada Fénix architektonische Elemente der olmekischen Kultur«, sagt Grube. Wie Inomatas Grabungen ergaben, hatten sich die frühen Maya auch bestimmte Rituale von den Nachbarn abgeschaut: Im Erdreich der E-Gruppe von Aguada Fénix entdeckten sie einen Hort aus grünen Steinäxten. Solche Depots, die vermutlich Gaben an die Götter waren, sind sowohl von olmekischen als auch von Maya-Bauten bekannt – etwa in Ceibal in Guatemala.

An diesem Fundplatz stießen Inomata und sein Team bereits 2015 auf eine ähnliche Anlage, ebenfalls mit Hilfe von Laserscanning aus der Luft.

Sie lokalisierten dort ein aufgeschüttetes Plateau – samt E-Gruppe und Steinäxten –, das etwas kleiner und jünger ist als sein Pendant in Aguada Fénix. Die rechteckige Plattform misst ungefähr 600 auf 340 Meter. Die Forscher datieren das Erdwerk um 950 v. Chr. An diesem Fundort hatten die Gruppe um Inomata erstmals die Anfänge der Maya aufgedeckt. »Ein enorm wichtiger Beitrag zum Verständnis der Wurzeln der Maya-Kultur«, urteilt Nikolai Grube.

Das Werk einer Gemeinschaft?

Doch die Fundsituation in Aguada Fénix legt eigentlich nahe, dass es nicht Maya, sondern Olmeken waren, die dort eine riesige Plattform errichteten. Dagegen sprechen laut Inomata die Gebrauchsgegenstände, die bei den Grabungen ans Licht kamen. So ähnelten die Keramikfunde den Gefäßen von anderen Maya-Fundorten wie Ceibal im Tiefland. Zudem entdeckten die Archäologen Bruchstücke

von Obsidiangeräten, deren Steinmaterial aus Regionen im heutigen Guatemala stammte – während die Olmeken ihren Obsidian aus mexikanischen Gebieten bezogen. »Zwar legen die Keramikfunde nicht notgedrungen nahe, dass die Erbauer von Aguada Fénix auch die Maya-Sprache gesprochen haben, aber sie scheinen kulturell dem Maya-Tiefland viel nähergestanden zu haben als den Olmeken«, schreiben Inomata und seine Kollegen in ihrem »Nature«-Beitrag.

Wer waren die Erbauer von Aguada Fénix? Waren sie – ähnlich wie ihre späteren Nachfolger im Tiefland – Herrscher über Stadtstaaten? Die Archäologen gehen vom Gegenteil aus. Denn bislang fehlen konkrete Hinweise auf Eliten, wie sie mit den kolossalen Porträtköpfen der Herrscher im benachbarten San Lorenzo existieren. »Anders als in den olmekischen Zentren zeigt Aguada Fénix keine klaren Anzeichen für eine ausgeprägte soziale Ungleichheit«, resümieren Inomata und seine Kollegen. Vielmehr hätten die Bewohner in einer kollektiven Anstrengung schätzungsweise 3,2 bis 4,3 Millionen Kubikmeter Erde für das Zeremonialplateau aufgeschüttet. 5000 Menschen hätten dafür zirka 2000 bis 2600 Arbeitstage gebraucht. Eine ähnliche Gesellschaftssituation postuliert Inomata für Ceibal. Auch dort spreche die Fundlage an der Plattform für ein gemeinschaftlich errichtetes Bauwerk.

Für den Forscher ist der Zeitpunkt, an dem monumentale Anlagen wie in Aguada Fénix und Ceibal erbaut wurden, kein Zufall. In jener Phase vollzieht sich ein tief greifender Wandel: Die Menschen gingen allmählich von einer mobilen zu einer sesshaften Lebensweise über. Und sie begannen, gezielt Mais zu kultivieren und Tongefäße zu fertigen. Dienten die Plattformen mit ihren astronomischen Observatorien (E-Gruppe) dann womöglich als Versammlungsplatz für die in der Region lebenden Menschen? »Archäologen versuchen zu verstehen, was bei der Entwicklung des Gemeinschaftslebens zuerst kam – die Sesshaftigkeit in festen Behausungen oder regelmäßige Zusammenkünfte bei rituellen Anläs-

sen«, erklärt McAnany. Bislang glaubte die Forschergemeinschaft, erst als sich Menschen niedergelassen hatten, hätten sie auch große Kultbauten angelegt. »Doch die neuen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass es genau umgekehrt verlief«, schreibt die Archäologin.

Keine Eliten, sondern frühe bäuerliche Gruppen hätten demnach die Plattform von Aguada Fénix gemeinschaftlich aufgeschüttet und sich dort zu Festzeiten getroffen. Auch Nikolai Grube hält die These einer flachen Hierarchie für plausibel. »Die Überlegungen sind sehr überzeugend, denn auch in anderen Bereichen Amerikas

und der Welt insgesamt gibt es Beispiele für frühe religiöse Architektur, die vor der Herausbildung hierarchisierter Gesellschaften entstand – etwa in Göbekli Tepe in der Türkei oder Cerro Sechín in den Anden.«

Takeshi Inomata und sein Team haben Licht in die weitgehend dunklen Anfänge der Maya gebracht. Ihre Forschung eröffnet eine neue Perspektive auf diese Kultur. Als Nächstes plant die Archäologengruppe mögliche Wohngebiete von Aguada Fénix ausfindig zu machen. »Wir haben jetzt substantielle Informationen über die Zeremonialbauten, aber wir wollen sehen, wie die Menschen in dieser Zeit

gelebt haben und wie sich ihre Lebensweise geändert hat.« ◀

Karin Schlott ist Archäologin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft« und »Spektrum Geschichte«.

QUELLEN

Inomata, T. et al.: Monumental architecture at Aguada Fénix and the rise of Maya civilization. *Nature* 582, 2020

Inomata, T. et al.: Artificial plateau construction during the Preclassic period at the Maya site of Ceibal, Guatemala. *PLOS ONE* 14, 2019

McAnany, P.A.: Large-scale early Maya sites in Mexico revealed by lidar mapping technology. *Nature* 582, 2020

PHYSIK INVERSER MPEMBA-EFFEKT

Manche Objekte könnten sich schneller erhitzen lassen, wenn man sie zuvor abkühlt.

▶ Als der 13-jährige tansanische Schüler Erasto Bartholomeo Mpemba 1963 Speiseeis herstellen sollte, beobachtete er etwas Seltsames: Eine flüssige Mischung, die eine Temperatur von 100 Grad Celsius hatte, gefror schneller als eine mit Raumtemperatur, die damals 35 Grad betrug. Weder er noch andere konnten das rätselhafte Phänomen erklären.

Einige Jahre später lud Mpembas Schulleiter den britischen Physiker Denis Osborne von der University of Dar es Salaam ein, der einen Gastvortrag über seine Arbeit hielt. Mpemba stellte am Ende der Präsentation die Frage, die ihn schon so lange beschäftigte: »Stellt man zwei Wasserbehälter mit gleichem Volumen, einen mit 35 Grad Celsius und einen mit 100 Grad Celsius, in einen Gefrierschrank, gefriert der heißere zuerst. Warum?« Die anwesenden Lehrer und Mitschüler verspotteten ihn. Niemand glaubte,

heißes Wasser könne schneller abkühlen als kaltes. Osborne zeigte sich überrumpelt, auch er hatte niemals von einem derartigen Verhalten gehört.

Zurück im Labor, ließ die Behauptung des tansanischen Schülers den britischen Forscher nicht los. Er begann, das geschilderte Experiment nachzustellen – und beobachtete tatsächlich, wie das fast kochende Wasser schneller gefror als solches bei Raumtemperatur. Daraufhin veröffentlichte er zusammen mit Mpemba 1967 einen Fachaufsatz über das ungewöhnliche Phänomen, das seither als Mpemba-Effekt bekannt ist.

Noch heute gibt dieser Physikern Rätsel auf. Es ist nicht so, dass eine wärmere Flüssigkeit immer schneller gefriert als eine kühlere. Stattdessen hängt der Prozess von den äußeren Umständen ab, der Form der genutzten Gefäße und den Anfangstemperaturen. Es gibt bestimmte Temperaturpaare, wie 100 und 35 Grad Celsius, bei denen der Effekt auftritt – das ist aber nicht bei beliebigen Werten der Fall. Zudem muss der Temperatursturz schlagartig einsetzen; senkt man die äußere Temperatur nur langsam ab, wird das kühlere Objekt schneller kalt.

Seit Jahrzehnten suchen Physiker nach einem Mechanismus, der das ungewöhnliche Verhalten erklärt. So untersuchten sie etwa, ob in offenen Gefäßen mehr Flüssigkeit der heißen Probe verdampft oder ob es Salze sind, die das schnellere Abkühlen fördern. Doch das Phänomen tritt sowohl bei geschlossenen Behältern als auch destilliertem Wasser auf. Momentan vermuten einige Experten, die bessere Wärmezirkulation in einem erhitzten Gefäß könne eine Rolle spielen.

Es funktioniert auch umgekehrt

2017 stießen Forscher auf die Möglichkeit, dass der Mpemba-Effekt auch umgekehrt funktionieren könnte: Ihrer Arbeit zufolge gibt es Situationen, in denen sich ein Material schneller aufwärmt, wenn man es zuvor abgekühlt hat. Nun haben Amit Gal und Oren Raz vom Weizmann-Institut für Wissenschaften in Rehovot ein konkretes Beispiel für ein System gefunden, bei dem dieser »inverse Mpemba-Effekt« eintritt.

Statt sich direkt echten Materialien zuzuwenden, die extrem kompliziert zu beschreiben sind, nutzten Gal und Raz ein vereinfachtes System namens

**Niemand glaubte,
dass heißes Wasser
schneller abkühlt**

Ising-Modell. Während reale Festkörper aus Abermilliarden verschiedener Teilchen bestehen, die auf unvorhersehbare Weise miteinander wechselwirken, besteht das zweidimensionale Ising-Modell bloß aus einem quadratischen Gitter aus N mal N Teilchen. Physiker greifen häufig darauf zurück, um Magnete theoretisch zu beschreiben. Die Teilchen innerhalb des Gitters entsprechen Miniaturversionen von Magneten, deren Nordpol entweder nach oben (Zustand +1) oder nach unten (Zustand -1) zeigt. Indem man zulässt, dass die winzigen Magnete sich beeinflussen, und ein äußeres Magnetfeld anlegt, kann man das Verhalten des Systems bei verschiedenen Temperaturen untersuchen. Ein Ferromagnet entspricht in diesem Bild einer Situation, in der die Teilchen versuchen, sich gleich auszurichten. Die Temperatur erzeugt Schwankungen, wodurch einzelne Miniaturmagnete ihren Pol umklappen. Je höher die umgebende Temperatur, desto ungeordneter ist das System – genau wie bei echten Ferromagneten.

In ihrer Arbeit betrachten Gal und Raz eine andere Version des zweidimensionalen Ising-Modells, bei dem es einen Antiferromagneten nachahmt. Die Miniaturmagnete versuchen sich dabei so auszurichten, dass auf einen nach oben gerichteten Nordpol stets ein nach unten zeigender folgt. Ohne äußeres Magnetfeld und am absoluten Temperaturnullpunkt hat das Gitter eine Gesamtmagnetisierung von null, da sich die Pole gegenseitig neutralisieren. Ein äußeres Feld lässt einige Teilchen ihre Ausrichtung ändern, zudem erzeugt Wärme willkürliche Schwankungen.

Die zwei israelischen Physiker haben ein solches antiferromagnetisches Ising-Modell mit einem schwachen äußeren Feld bei einer Ausgangstemperatur T_0 untersucht und die Magnetisierung sowie die Ausrichtung der winzigen Magnete bestimmt. Anschließend setzten sie das gesamte Gitter einer äußeren Temperatur von T_{\max} aus, die höher als T_0 ist, und warteten, bis sich das System entsprechend erhitzt hat – etwa so, als hätten sie das Gitter in einen Ofen gepackt.

Anschließend wiederholten sie den Prozess, statt die Temperatur aber direkt von T_0 nach T_{\max} zu erhöhen, kühlten sie das Gitter erst auf T_{kalt} ab (eine geringere Temperatur als T_0) und erhitzen es dann schlagartig. Wie sich zeigte, brauchte das Gitter im zweiten Fall weniger Zeit, bis es T_{\max} erreichte und sich im Gleichgewicht befand. Damit haben Raz und Gal erstmals ein System gefunden, in dem der inverse Mpemba-Effekt auftritt.

Auf dem Weg zu realen Materialien

Bisher konnten die Forscher das ungewöhnliche Verhalten jedoch nur in Computersimulationen beobachten. Zudem stellt das untersuchte System eine vereinfachte Version echter Festkörper dar. Dennoch haben das Ising-Modell und reale Materialien viele Gemeinsamkeiten, weshalb Forscher gern darauf zurückgreifen. Weil sich das Ising-Modell einfacher untersuchen lässt, hoffen Gal und Raz den Mechanismus zu finden, der zum inversen Mpemba-Effekt führt.

Vermutlich beeinflusst das Abkühlen das System auf irgendeine Weise, die über eine bloße Senkung der Temperatur hinausgeht. Andernfalls würde es keinen Unterschied machen, ob man es zuerst abkühlt und dann erhitzt oder direkt erwärmt.

Offenbar verändern sich im Ising-Modell die gesamte Magnetisierung und die Ausrichtung der Teilchen, wenn man das Gitter abkühlt. Wählt man die richtigen Ausgangstemperaturen, führt die neue Konfiguration dazu, dass sich das System von der kälteren Temperatur aus schneller erwärmt. Laut Gal und Raz könnte es in echten Festkörpern ähnliche Prozesse geben, wodurch der inverse Mpemba-Effekt auch dort auftritt. Daher untersuchen sie nun magnetische Legierungen, um das Phänomen dort zu beobachten.

Der inverse Mpemba-Effekt wirkt sich wohl nicht auf unser tägliches Leben aus: Eine Pizza wird nicht schneller warm, wenn man sie vorher in den Kühlschrank steckt. Trotzdem könnte der Effekt praktische Anwendungen haben. Wissenschaftler suchen schon länger nach Möglichkeiten, um quantenmechanische Bauteile rascher zu erwärmen. Das unerwartete Phänomen könnte den Schlüssel dafür liefern. ◀

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

QUELLEN

Gal, A., Raz, O.: Precooling strategy allows exponentially faster heating. *Physical Review Letters* 124, 2020

Lu, Z., Raz, O.: Nonequilibrium thermodynamics of the Markovian Mpemba effect and its inverse. *PNAS* 114, 2017

HIRNFORSCHUNG VOM STRESS ZUM FIEBER

Psychische Belastungen lösen physische Reaktionen aus wie etwa einen Anstieg der Körpertemperatur. Forscher stießen nun auf einen Hirnschaltkreis, der diese stressbedingte Wärmeproduktion kontrolliert.

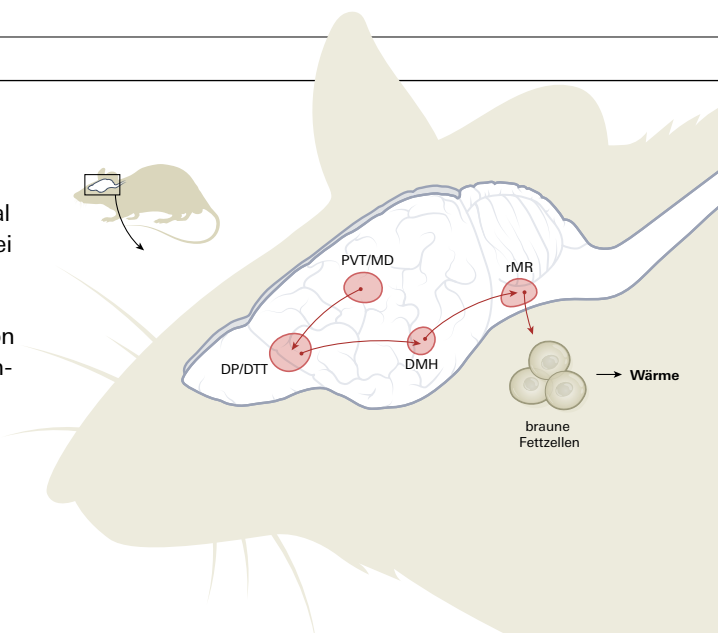
► Sie betreten die Bühne, um vor einem großen Publikum zu sprechen. Ihr Herzschlag und Ihr Blutdruck steigen, Sie atmen schneller, Ihre Handflächen schwitzen. Ihr Körper reagiert mit einem alten evolutionären Programm, um der drohenden Gefahr entweder zu trotzen oder schnell wegzurennen. Hierzu gehört auch der Anstieg der Körpertemperatur. Bei

viele Säugetieren, vom Nager bis zum Menschen, kann emotionaler Stress ein solches psychogenes Fieber auslösen. Welcher neuronale Mechanismus steckt dahinter?

Die Arbeitsgruppe von Kazuhiro Nakamura von der japanischen Universität Nagoya erforscht seit Jahren diese psychisch induzierte Hyperthermie. Dabei suchen die Forscher nach

Hitzestress

Eine bestimmte Hirnregion namens DP/DTT (dorsal peduncular cortex / dorsal taenia tecta) fungiert bei Ratten als zentrales Steuerelement für die Regulation der Körpertemperatur unter sozialem Stress. Sie wird bei psychisch belastenden Situationen von zwei Arealen des Thalamus, dem Nucleus paraventricularis (PVT) sowie dem Nucleus mediodorsalis (MD), aktiviert. Die DP/DTT-Neurone erregen daraufhin den dorsomedialen Hypothalamus (DMH), der wiederum Signale an die rostralen Raphekerne (rMR, rostral medullary raphe) sendet. Diese regen dann das braune Fettgewebe des Körpers an, Wärme zu erzeugen.



NATURE | LIN, D. A HEATED RESPONSE TO DANGER. NATURE 580, 2020.
FIG. 1. DT BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

dem neuronalen Schaltkreis, der das braune Fettgewebe kontrolliert. Letzteres kann bei Bedarf Wärme erzeugen. 2011 hatten die Wissenschaftler beobachtet, dass die stressbedingte Hyperthermie gedämpft wird, wenn sie die im braunen Fett reichlich vorhandenen β_3 -adrenergen Rezeptoren blockieren.

Bereits 2004 konnte die Arbeitsgruppe durch Markierungsexperimente bei Ratten die neuronale Verknüpfung des braunen Fettgewebes mit bestimmten Zellgruppen des Hirnstamms aufspüren. Diese im verlängerten Rückenmark sitzenden Neurone werden als rostrale Raphekerne oder kurz rMR (rostral medullary raphe) bezeichnet. 2014 identifizierten die japanischen Forscher den dorsomedialen Hypothalamus (DMH) im Zwischenhirn als Schlüsselregion der Wärmeregulation: Als sie die Verbindung zwischen DMH und rMR bei den Versuchstieren künstlich aktivierten, stieg die Wärmeproduktion des braunen Fettgewebes an. Für die Wissenschaftler unerwartet, erhöhten sich ebenfalls Herzschlag und Blutdruck. Demnach scheint der DMH-rMR-Weg mehrere physiologische Stressreaktionen zu kontrollieren.

Beim Menschen tritt Stress meist in komplexen sozialen Situationen auf, so dass auch höhere Hirnregionen an der Verarbeitung beteiligt sein sollten. Nach genau diesen Arealen der Hirnrinde suchten jetzt die Forscher um

Nakamura. Wie zuvor setzten sie hierfür bei Ratten so genannte retrograde Tracer ein, bei denen eine in die Nervenzelle injizierte Markierungssubstanz vom Axon zum Zellkörper – also entgegen der Signalleitungsrichtung, quasi rückwärts – transportiert wird. Wie die Wissenschaftler beobachteten, wurde dabei lediglich eine einzige, bislang wenig untersuchte Hirnregion markiert, die unter dem Kürzel DP/DTT (dorsal peduncular cortex / dorsal taenia tecta) firmiert. Das Areal regt sich ebenfalls, wenn eine Ratte im Kampf gegen einen dominanten Artgenossen unterliegt.

Signalweg des Stresses

Um die Rolle dieser Region bei Stress zu untersuchen, kappten die Forscher bei ihren Versuchstieren die neuronale Verbindung zum DMH auf drei verschiedene Arten: Sie blockierten einerseits die DP/DTT-Aktivität mit einem chemischen Inhibitor; sie zerstörten andererseits mit einem Virus die vom DP/DTT zum DMH verlaufenden Nervenzellen; und drittens unterbanden sie optogenetisch die Aktivität der DP/DTT-Neurone. In allen Fällen

reduzierte sich damit die stressbedingte Hyperthermie der Nager.

Im Gegensatz dazu löste die künstliche Aktivierung der neuronalen Verbindungen zwischen den beiden Regionen eine ganze Reihe physiologischer Reaktionen aus, darunter einen Anstieg des Herzschlags, des Blutdrucks sowie der Wärmeproduktion des braunen Fettgewebes. Die japanischen Forscher hatten somit nachgewiesen, dass die DP/DTT-Neurone erregende Signale zum DMH senden, der wiederum mit den Raphekernen des Stammhirns verknüpft ist. Damit ergibt sich für den stressbedingten Anstieg der Körpertemperatur ein neuronaler Signalweg von DP/DTT über DMH und rMR zum braunen Fettgewebe (siehe »Hitzestress«, oben).

Wie gelangt die stressbedingte Information zum DP/DTT? Gemäß weiteren Nachverfolgungen mit retrograden Tracern stammen die stärksten Impulse von Zellanhäufungen im Thalamus, die als Nucleus paraventricularis und Nucleus mediodorsalis bekannt sind. Ersterer reagiert sehr empfindlich auf verschiedene physische und psychische Stressoren wie Schmerz oder Bedrohung durch Raubtiere. Im Gegensatz dazu vermittelt Letzterer zusammen mit dem präfrontalen Kortex komplexe kognitive Funktionen wie Lernen, Abstraktion oder (beim Menschen) das Vorstel-

Angst hängt von der körperlichen Reaktion ab

lungsvermögen. Somit kann jede mögliche Belastung – vom körperlichen Leid bis hin zu juristischen Auseinandersetzungen – den Weg zum DP/DTT finden. Unklar bleibt hier allerdings, wie die verschiedenen Stressfaktoren dieses Hirnareal beeinflussen, inwieweit sich Erfahrungen auf seine Reaktionen auswirken oder ob geschädigte DP/DTT-Zellen krankhafte physiologische Stressantworten auslösen können. Zukünftige Studien sollten solche Fragen klären.

Laut dem US-amerikanischen Philosophen und Psychologen William James (1842–1910) ist Angst eine Interpretation des Geistes einer körperlichen Reaktion auf Bedrohung – und nicht umgekehrt. Mit anderen Worten: Wir laufen nicht deshalb vor einem Bären weg, weil wir Angst haben, sondern wir haben Angst, weil wir weglaufen. Falls James richtigliegt, sollten Ratten ihre Furcht verlieren, sobald ihre physiologischen Reaktionen auf eine Bedrohung blockiert sind. Die Forscher um Nakamura wollten daher auch wissen, ob die Hemmung

des DP/DTT-DMH-Wegs die Angst von Ratten unterdrückt, die sich mit einem aggressiven Gegenüber konfrontiert sehen.

Normalerweise zeigt eine Ratte, die noch nie eine Niederlage durch einen Artgenossen erleiden musste, keinerlei Furcht und beschnuppert auch ein dominantes Tier mit großem Interesse. Dagegen wird ein ihm bereits einmal unterlegenes Individuum versuchen, dem Aggressor auszuweichen. Und tatsächlich verhielten sich zuvor besiegte Versuchstiere mit blockiertem DP/DTT-DMH-Weg genauso wie unerfahrene Ratten.

Somit hängen ängstliches Verhalten und vielleicht sogar auch die Wahrnehmung von Furcht von der körperlichen Reaktion auf Bedrohung ab. Die Ergebnisse der Forscher erklären, warum wir uns mit einem tiefen Atemzug vor einem öffentlichen Vortrag beruhigen können. Die Unterdrückung physiologischer Stressreaktionen könnte ein wirksames Mittel darstellen, belastende Gefühle zu mildern. Nicht durch Stress bedingte Verände-

rungen der Körpertemperatur – etwa bei Fieber oder Unterkühlung – werden von einer anderen, dem DMH vorgeschalteten Region kontrolliert, dem so genannten präoptischen Areal. Eine Blockade des DP/DTT-DMH-Signalwegs sollte daher die normale Temperaturregulation unberührt lassen. Auch wenn es noch etwas spekulativ klingt, könnte demnach ein Eingriff in die DP/DTT-Neurone eine Möglichkeit liefern, chronischen psychischen Stress zu behandeln. ◀

Dayu Lin ist Neurobiologin und außerordentliche Professorin für Psychiatrie, Neurowissenschaft und Physiologie an der New York University Grossman School of Medicine (USA).

QUELLE

Kataoka, N. et al.: A central master driver of psychosocial stress responses in the rat. *Science* 367, 2020

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 580, S. 189–190, 2020

MEDIKAMENTENENTWICKLUNG MIT MANGAN ZUM »MAGISCHEN METHYLEFFEKT«

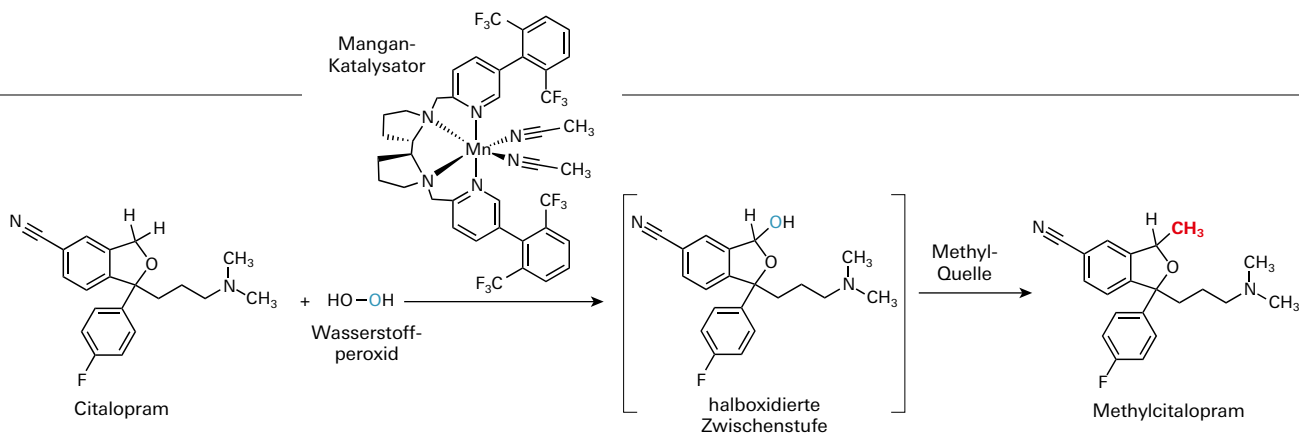
Um die Eigenschaften eines pharmazeutischen Wirkstoffs drastisch zu verändern, genügt es oft schon, ein kleines chemisches Strukturelement – eine Methylgruppe – hinzuzufügen. Mit einem neuen Katalysator lässt sich diese Modifikation jetzt viel schneller und unkomplizierter als bisher vornehmen.

► Auf der Suche nach pharmazeutischen Wirkstoffen bauen Forscherinnen und Forscher immer wieder neue Moleküle zusammen und testen sie, bis schließlich eines mit den erhofften Eigenschaften gefunden ist. Solch ein Prozess zieht sich im Regelfall über mehr als zehn Jahre und kostet Milliarden. Denn von etwa 5000 hergestellten und getesteten Komponenten wird im Schnitt nur eine tatsächlich als Medikament zugelassen. Um die Medikamentenentwicklung zu beschleunigen, gibt es unter anderem den Ansatz der so

genannten Late-stage-Funktionalisierung: Dabei fügt man bereits bestehenden Wirkstoffen neue Atome oder Atomgruppen hinzu, in der Hoffnung, deren pharmazeutische Eigenschaften dadurch positiv zu beeinflussen. Das ist aber alles andere als einfach. Jetzt hat ein Team um Kaibo Feng und Raundi E. Quevedo an der University of Illinois einen großen Fortschritt in dieser Richtung gemacht.

Eine einzige zusätzliche »funktionelle Gruppe« aus wenigen Atomen kann die Eigenschaften eines medizinisch wirksamen Moleküls entscheidend

verändern. Fügt man etwa eine Methylgruppe hinzu ($-\text{CH}_3$, eine der kleinsten funktionellen Einheiten), bindet die Substanz bisweilen um das 1000-Fache besser an ihr biologisches Ziel. Das Phänomen ist als »magischer Methyl-Effekt« bekannt. Es kommt deshalb zu Stande, weil der Anbau der kleinen chemischen Gruppe die Form des Moleküls derart verändert, dass es sich viel bereitwilliger in das aktive Zentrum des Proteins einfügt, an das es binden soll – ähnlich, wie eine ergonomische Computermaus perfekt in eine Hand passt.



Ein hoch spezialisierter Mangan-Katalysator erlaubt es, Methylgruppen (-CH₃) an genau definierten Stellen in komplexe Strukturen einzubauen.

Selbst kleinste Änderungen an Molekülen vorzunehmen, ist jedoch oft ein Riesenunterfangen. Häufig müssen Chemikerinnen und Chemiker dazu die gesamte Struktur auseinanderbrechen und Dutzende Fragmente wieder zusammensetzen. Das ist ungefähr so, als würde man ein Haus abreißen und neu bauen, nur um ein

besseres Fenster einzusetzen! In der Medikamentenentwicklung ist das regelmäßig notwendig.

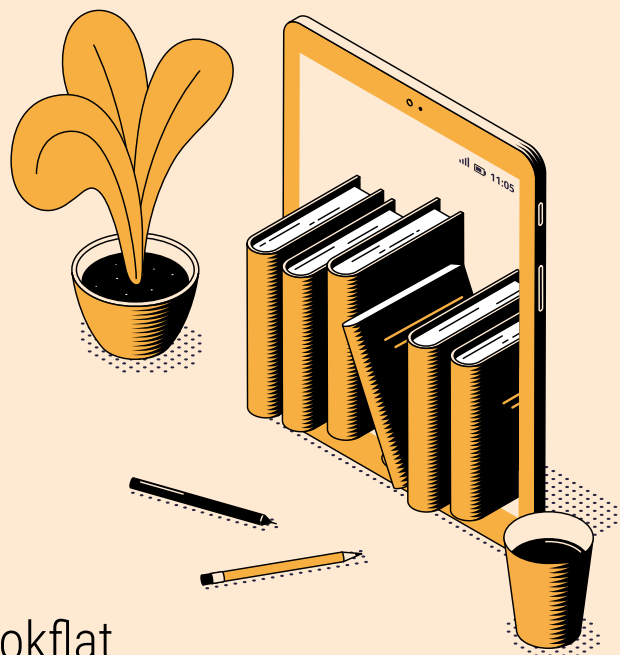
Daher hat die Late-stage-Funktionalisierung ein großes Potenzial, die Entdeckung neuer Wirkstoffe zu beschleunigen. So wie die Konstrukteure eines Hauses gezielt die Wände aufsägen, um neue Fenster einzusetzen, wollen Chemiker bestehende Bindungen zwischen Atomen aufbrechen, um neue funktionelle Gruppen einzubauen. Als Methode dafür empfiehlt sich die C-H-Funktionalisierung: Bei ihr überführt man die in komplexen

Molekülen überall vorkommenden Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindungen (C-H-Bindungen) in andere chemische Einheiten. Die Forschungsgruppe um Feng und Quevedo hat jetzt einen Katalysator entwickelt, der spezifische C-H-Bindungen durchtrennen kann, um an der entsprechenden Stelle eine Methyleinheit anzufügen. Dadurch lässt sich der magische Methyl-Effekt in zahlreichen komplexen Verbindungen erforschen.

Die Natur bedient sich bereits ständig solch eines hoch spezialiserten Werkzeugs. Eisenhaltige Enzyme,

Die Spektrum eBookFlat

Mit der **Spektrum eBookFlat** erhalten Sie Zugriff auf eine Auswahl von zwölf E-Books (PDF-Format) des Sachbuchprogramms von **Springer Spektrum** aus den Bereichen Mathematik und Naturwissenschaften. Jeden Monat wird ein Buch ausgetauscht, so dass Sie im Jahr auf bis zu 24 Bücher zugreifen können. € 99,- im Jahresabo oder € 8,99 im jederzeit kündbaren Monatsabo.



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

die Cytochrome P450 (CYP450), spielen eine wichtige Rolle bei der Regulierung des Stoffwechsels und sind im Tierreich daher allgegenwärtig. Das Eisenatom eines CYP450 heftet sich an biologisch aktive Moleküle und wandelt dort C–H-Bindungen in Kohlenstoff-Sauerstoff-Doppelbindungen (C=O) um. Dass das katalytisch sonst hochaktive Eisen nicht alle möglichen Strukturen umsetzt, sondern spezifische und präzise Reaktionen vermittelt, liegt an der ausgeklügelten Proteinarchitektur rund um das Metallzentrum: Dank ihr werden nur diejenigen Substrate oxidiert, die in die Enzymtasche passen.

Eisenkatalysatoren, wie die Natur sie nutzt, waren zu reaktiv

Die Forschungsgruppe um M. Christina White, in der Feng und Quevedo arbeiten, stellt schon seit Langem Moleküle her, welche die Architektur der CYP450-Enzyme nachbilden. Mit ihrer Hilfe wollen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bei unterschiedlichsten Substraten C–H-Bindungen in C=O-Bindungen verwandeln. Dabei nutzen sie Wasserstoffperoxid als Quelle für Sauerstoff. Doch selbst ihre besten Katalysatoren reagierten mit zahlreichen verschiedenen C–H-Bindungen, statt sich nur auf eine zu beschränken. Da komplexe Moleküle oft viele unterschiedliche chemische Einheiten mit bestimmten Funktionen besitzen, verändert der Reaktionsvermittler dann meist nicht nur die gewünschte C–H-Bindung, sondern auch andere. Dieselbe Forschungsgruppe hat deshalb untersucht, ob sich Mangan – der weniger stark oxidierende Nachbar des Eisens im Periodensystem der Elemente – als alternatives Metallzentrum eignet, um spezifische C–H-Bindungen in komplexen Molekülen umzusetzen.

Die Hypothese dahinter: Ein weniger oxidierender Mangan-Katalysator greift nur diejenigen Bindungen an, die bei einem Einsatz als Wirkstoff und folgendem Abbau durch den Stoffwechsel als erste gelöst würden. Darüber hinaus glaubten die Forscher die Oxidationsreaktion auf halbem

Weg anhalten zu können. So ließe sich eine halboxidierte Zwischenstufe herstellen, die man leicht in eine Methylgruppe überführen könnte (siehe Grafik auf S. 33). Diese würde im Wesentlichen verhindern, dass das Molekül weiter metabolisch abgebaut würde. Entsprechend könnte es wesentlich länger wirken – willkommen beim magischen Methyl-Effekt!

Die Herausforderung bei dem Ansatz ist, dass die halboxidierte Zwischenstufe eigentlich noch schneller zur komplett oxidierten Form reagiert als das ursprüngliche Material. Wäre die Oxidationsreaktion ein Zug, würde sie quasi ohne Halt bis zur C=O-Bindung fahren. Um das zu verhindern, gaben die Autoren der Studie genau die Mengen an Katalysator und Wasserstoffperoxid zur Reaktionsmischung hinzu, die nötig sind, um zu der gewünschten Zwischenstufe zu

Mit Mangan glaubten die Forscher die Reaktion auf halbem Weg anhalten zu können

gelangen. Sie lenkten den Zug also auf halber Strecke in eine Haltestelle. Die so hergestellte Einheit lässt sich dann nahtlos in eine Methylgruppe verwandeln – je nachdem, welche weiteren chemischen Einheiten vorhanden sind, unter unterschiedlichen Bedingungen.

Wie Feng und seine Kollegen berichten, führten sie ihre neuen Reaktionen mit 38 biologisch bedeutenden Substanzen durch: mit Medikamenten, Naturstoffen, Peptiden und Steroiden sowie deren strukturellen Untereinheiten. Dabei sind die Reaktionen hochselektiv verlaufen, und selbst verschiedenste funktionelle Gruppen störten die Umsetzung nicht. Hier zeigt sich aber auch das Interesse der pharmazeutischen Industrie an der Forschungsarbeit: Die Moleküle, die ausgewählt wurden, um die Methode zu erläutern, spiegeln genau die Typen von Substanzen wider, denen man

häufig in der Medikamentenentwicklung begegnet.

Mehr als 100 Jahre lang hat sich die Wirkstoffforschung hauptsächlich auf kleine Moleküle konzentriert. Doch jetzt wendet sich das Feld komplizierteren Strukturen zu, etwa Peptiden, die potenziell komplexe biologische Zielsubstanzen hochspezifisch umsetzen können. Peptide baut man normalerweise aus Aminosäuren auf, indem man diese eine nach der anderen in aufeinander folgenden Reaktionen aneinanderreicht. Die strukturelle Vielfalt der Peptide entsteht dadurch, dass verschiedene Aminosäuren unterschiedliche funktionelle Gruppen tragen. Wann welche ins Spiel kommt, hängt also davon ab, in welchem Schritt die jeweilige Aminosäure eingebaut wird. Unweigerlich führt man dadurch manche der chemischen Einheiten gleich im ersten Reaktionsschritt ein, und sie lassen sich nur verändern, indem man die gesamte Reaktionsreihe von Neuem durchführt und mit einer anderen Aminosäure startet.

Das Team um Feng hebt diese Regel aus, indem es ein Tetrapeptid (ein Peptid aus vier Aminosäuren) am Ende der Reaktionsfolge mit einer Methylgruppe versieht. Würde man das Prinzip auf komplexere lineare und ringbildende Peptide ausweiten, wäre das eine bahnbrechende Entwicklung für die Wirkstoffforschung. ◀

Emily B. Corcoran und **Danielle M. Schultz** forschen bei der Firma Merck in Boston und Kenilworth (USA).

QUELLEN

Feng, K. et al.: Late-stage oxidative C(*sp*³)-H methylation. *Nature* 580, 2020

Schönherr, H., Cernak, T.: Profound methyl effects in drug discovery and a call for new C–H methylation reactions. *Angewandte Chemie International Edition* 52, 2013

Zhao, J. et al.: Chemoselective methylene oxidation in aromatic molecules. *Nature Chemistry* 11, 2019

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 580, S. 592–593, 2020



SPRINGER'S EINWÜRFE QUO VADIS, COMPUTER?

Die Produktion immer kleinerer Schaltkreise stößt an ihre Grenzen. Ihre große Zukunft liegt in der Spezialisierung.

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/1752454

Mit dem visionären Satz »Unten ist eine Menge Platz« sah Richard Feynman schon 1959 die heutige Nanotechnologie und miniaturisierte Computer voraus. Einmal in Gang gekommen, schien das Schrumpfen der Schaltkreise kein Halten zu kennen. Gut 50 Jahre lang folgte es dem mooreschen Gesetz, wonach etwa alle zwei Jahre doppelt so viele Transistoren auf einen Chip passten. Doch allmählich ist es da unten wirklich eng geworden (siehe meinen Einwurf von April 2016).

Wie kann es weitergehen? Mit einem programmatischen Artikel stellen sieben Informatiker um Charles E. Leiserson vom Massachusetts Institute of Technology den Satz von Feynman auf den Kopf: Oben ist eine Menge Platz, verkünden sie. Nach dem Ende von Moores Gesetz werde die Computerleistung durchaus weiter wachsen, zwar nicht mehr durch Miniaturisierung, aber dafür an den drei Fronten Software, Algorithmen und Hardware (*Science* 368, *eaam9744*, 2020).

Tatsächlich habe der zur Lösung komplizierter Probleme erforderliche Rechenaufwand seit Ende der 1970er Jahre fast ebenso sehr von besseren Algorithmen profitiert wie von der immer schnelleren Hardware. In der Nach-Moore-Ära werde es darauf ankommen, die Komponenten optimal auf einander abzustimmen. Der vertraute Computer als Alleskönner würde demnach von eigens für spezifische Aufgaben entwickelten Rechenmaschinen abgelöst werden. Diese Entwicklung wird, wie die Forscher einräumen, wohl nicht so gleichmäßig voranschreiten wie bisher, sondern weniger vorhersehbar, sprunghafter und aufwändiger.

Ein Beispiel für eine völlig neuartige, auf ein spezielles Problem zugeschnittene Hardware liefert ein Team von Computerwissenschaftlern um Tao Chen an der niederländischen Universität Twente in Enschede. An Stelle üblicher Transistoren arbeiten hier zufallsverteilte »Tümpel« von Gold-Nanopartikeln auf einer Siliziumoberfläche. Zwischen bestimmten Ladungsinselfen

Allmählich ist es da unten wirklich eng geworden

können je nach einer von außen angelegten Steuerung Ladungsträger überspringen oder nicht. Diese Verschaltung ist zu maschinellem Lernen fähig und kann handgeschriebene Ziffern leichter identifizieren als das neuronale Netz eines herkömmlichen Computers (*Nature* 577, S. 341–345, 2020).

Ähnelt schon solche Hardware der flexiblen Verknüpfung von Nervenzellen, so nehmen sich Roboterentwickler für die Software neuerdings Insektengehirne zum direkten Vorbild. Das berichtet die Informatikerin Barbara Webb von der University of Edinburgh (*Science* 368, S. 244–245, 2020). Nach dem Vorbild der Natur spüren künstliche Neurone schnelle Bewegungen in einem Sensorfeld auf; sie lernen, da sie mit der eigenen Motorik verschaltet sind, zu unterscheiden, ob die Veränderungen im Sehfeld von den Eigenbewegungen des Roboters stammen. Es gelingt ihnen schnell, die räumliche Orientierung eines Insekts nachzubilden, das zum Ausgangspunkt seiner Nahrungssuche zurückfindet.

Die Hardware funktioniert zwar auf der Basis herkömmlicher neuronaler Netze, aber die Software ist ganz auf ihre besondere Aufgabe zugeschnitten: Sie simuliert getreu die Spezialisierung verschiedener lernfähiger Regionen im Gehirn von Libellen oder Gottesanbeterinnen.

Die Beispiele zeigen: Die spektakulärsten Fortschritte der Computerentwicklung könnten künftig auf lernenden Maschinen beruhen, deren Hardware, Algorithmen und Software die noch lange unerreichten Leistungen natürlicher Gehirne nachzubilden versuchen. Und dort oben ist wirklich noch viel Platz.

EVOLUTION

DIE ERSTEN SÄUGETIERE

Zahlreiche Fossilfunde offenbaren eine erstaunliche Vielseitigkeit der frühen Säuger und ihrer Vorläufer.



John Pickrell ist Wissenschaftsjournalist in Sydney (Australien).

► spektrum.de/artikel/1752442

Die Nacht bricht an. *Kayentatherium*, ein katzen großes Wesen, versorgt seine frisch geschlüpfte Brut. Heftiger Regen trommelt auf den Erdwall über seiner Höhle, während das Tier seine zahlreichen winzigen Jungen betrachtet. *Kayentatherium* könnte leicht als Säugetier durchgehen, aber der mächtige Kiefer, die charakteristischen Zähne sowie das Fehlen äußerer Ohren verraten seine wahre Identität: Es handelt sich um einen Vertreter der Cynodontia, der Hundszahnsaurier, aus denen die Säuger erst hervorgehen sollen. Plötzlich bricht die völlig durchweichte Böschung ein und begräbt das Muttertier mitsamt seinem Nachwuchs im Schlamm.

So blieben sie 185 Millionen Jahre lang liegen. Schließlich, im Sommer 2000, stieß eine Gruppe Fossilienjäger, die unter der Leitung von Timothy Rowe von der University of Texas in den Gesteinsschichten der Kayenta-Formation im nördlichen Arizona nach Überresten aus der Jurazeit grub, auf die verstreut liegenden Knochen.

Diese Versteinerungen beeindruckten die Paläontologen zunächst nur wenig. Die Forscher gruben den Felsblock aus und verfrachteten ihn ins Labor. Erst neun Jahre später bemerkte ein Spezialist, der das Fossil zur weiteren Analyse präparierte, etwas Erstaunliches: Eingebettet im Gestein befanden sich winzige Zähne und Kiefer, die lediglich einen

SERIE

Die Entfaltung des Lebens

Teil 1: Juli 2020

In der Tiefe geboren
Ulrich C. Schreiber und
Christian Mayer

Teil 2: August 2020

Aufstieg der Tiere
Rachel A. Wood

Teil 3: September 2020

Die ersten Säugetiere
John Pickrell



Zentimeter maßen. »Sofort hörten sie mit der Präparation auf und überlegten, wie man die Babys zerstörungsfrei untersuchen könnte«, erzählt Eva Hoffman, Rowes damalige Kollegin an der University of Texas, die heute als Paläontologin am American Museum of Natural History in New York arbeitet. Anstatt das Gestein aufzubrechen und die Knochen frei zu legen, extrahierten die Wissenschaftler die Fossilien virtuell unter Einsatz eines Mikrocomputertomografen, der mit Röntgenstrahlen hochauflösende dreidimensionale Bilder erzeugt.

Was die Forscher in dem Felsblock gefunden hatten, waren die ersten bekannten Jungen von Säugetieren beziehungsweise deren Vorfahren aus dem Unterjura. Da es sich nicht nur um einen einzigen Nachkommen, sondern um stattliche 38 handelte, zählt die Entdeckung zu den bedeutendsten, die in den letzten Jahren im Zusammenhang mit dem Ursprung der Säuger gemacht wurden. *Kayentatherium* steht an der Schwelle der Mammalia und liefert nach Ansicht der Wissenschaftler grundlegende Erkenntnisse, welche Merkmale diese Wirbeltierklasse definieren und welche bereits bei ihren frühen Verwandten zu finden waren.

Obwohl das Skelett von *Kayentatherium* in vielerlei Hinsicht dem der Säugetiere entspricht, ließ der Fossilfund erahnen, dass sich das Tier noch immer ähnlich wie ein Reptil fortpflanzte und zahlreiche Nachkommen mit gerin-

Etliche in Nordchina gefundene Fossilien wie die rattengroße Spezies *Liaconodon hui* aus der Kreidezeit lieferten ein genaueres Bild von der Evolution der Säugermerkmale.

AUF EINEN BLICK UNTERSCHÄTZTE VORFAHREN

- 1** Lange gab es die Vorstellung, dass die Vorläufer der Säugetiere im Erdmittelalter als kleine, unscheinbare Insektenfresser ihr Dasein im Schatten der Dinosaurier fristeten.
- 2** Fossilfunde der letzten Jahre widerlegten dieses Bild. Ihnen zufolge besaßen frühe Mammalia eine erstaunliche Vielfalt und besetzten zahlreiche ökologische Nischen.
- 3** Säugetiertypische Spezialisierungen wie ein komplexes Gebiss, scharfe Sinne und das Säugen weniger Nachkommen hatten sich vermutlich bereits entwickelt, bevor die »echten« Säugetiere die Bühne betraten.

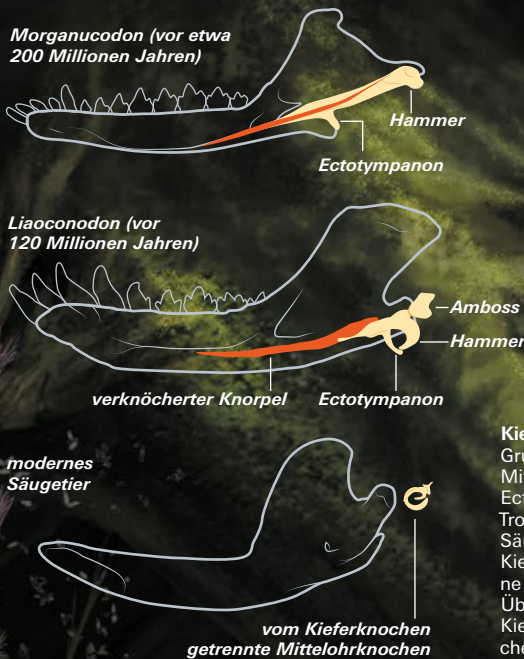
gem Hirnvolumen zur Welt brachte. Im Gegensatz dazu »investieren Säugetiermütter sehr viel Energie in die Aufzucht einer kleineren Nachkommenschaft, bei der jedes Individuum eine bessere Überlebenschance hat«, verdeutlicht Hoffman. Säugetierjunge verbringen eine längere Zeit in der Obhut ihrer Eltern und entwickeln ein relativ großes Gehirn, während die fossilen Schlüpflinge bereits über gut ausgebildete Knochen und Zähne verfügten – ein Hinweis darauf, dass sie sich allein durchschlagen konnten und nicht, wie alle heutigen Säuger, zunächst mit Muttermilch gefüttert wurden.

Jener Fund aus Arizona gehört zu den unzähligen der letzten 10 bis 20 Jahre, die Schlaglichter auf die Evolution der Mammalia werfen. Wie die Versteinerungen belegen, wiesen die ersten Vertreter der Säugetiere bereits eine beachtliche ökologische Vielfalt auf sowie verschiedene Fähigkeiten wie Gleiten, Schwimmen, Graben oder Klettern.



Markenzeichen der Säugetiere

Eine Fülle außergewöhnlicher Fossilfunde enthüllt aufschlussreiche Details darüber, wie sich die Säugetiere aus ihren reptilienartigen Vorfahren entwickelten. Demnach bildeten die frühen Säugetiere eine vielfältige Gruppe mit bereits komplexen Eigenschaften. Etliche definierende Merkmale der Mammalia – wie das Saugen von Milch, ein außergewöhnliches Hörvermögen sowie geringe Nachkommenzahl – waren schon entstanden, als die ersten modernen Säugetiere Land, Wasser und Luft eroberten.



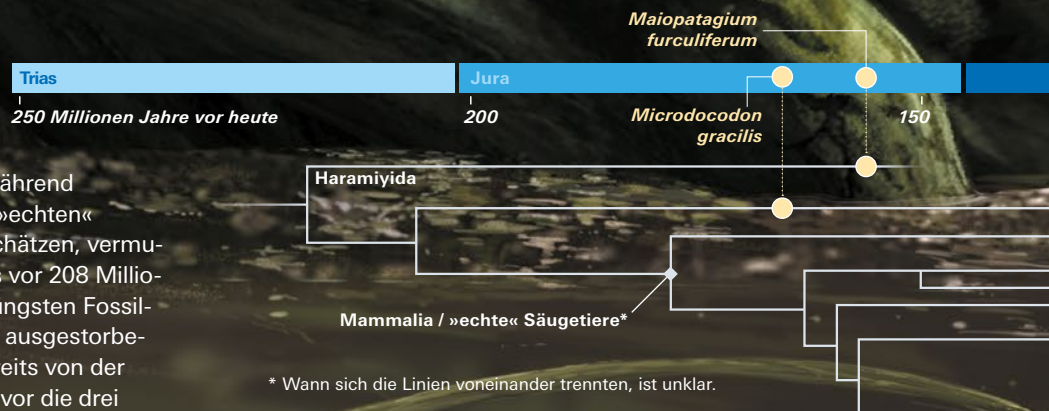
Kiefer wird zum Ohr
Grundlage des feinen Gehörs der Säugetiere bilden drei Mittelohrknochen (gelb): Hammer, Amboss und Ectotympanon, ein ringförmiger Stützknochen des Trommelfells. Bei Reptilien sowie den Vorfahren der Säugetiere dienten diese Knochen als Bestandteile des Kiefers zur Nahrungsaufbereitung. Die 2011 beschriebene Art *Liaoconodon hui* (großes Bild) offenbarte ein Übergangsstadium: Ein verknöchertes Knorpelstück des Kiefers (orange) fungierte als Stütze der Mittelohrknochen und des Trommelfells.

Seite an Seite mit Dinosauriern
Frühe Säugetierformen wie *Liaoconodon hui* lebten neben gefiederten Dinosauriern wie *Sinotyrannus* in den klimatisch gemäßigten Ökosystemen der Kreidezeit in der heutigen nordchinesischen Provinz Liaoning.

ILLUSTRATIONEN: DAVIDE BONADONNA; LIAOCONODON, HUI & KIEFER WIRD ZUM OHR NACH MENG, J. ET AL.: TRANSITIONAL MAMMALIAN MIDDLE EAR FROM A NEW CRETACEOUS JIHOI EPOCH IN CHINA, IN: NATURE 472, 2011; STAMMBAUM NACH LUD, Z. X.: TRANSFORMATIONS AND DIVERSIFICATION IN EARLY MAMMAL EVOLUTION, IN: NATURE 450, 2007 / DESIGN: VIKS FERNANDEZ/ARTAGE; PICKWELL, J.: THE MAKING OF MAMMALS, NATURE 374, 2013

Umstrittene Dynastie

Wie setzt sich der Säugetierstammbaum zusammen, welche Arten gehören dazu, und wie weit reichen seine Wurzeln zurück? Diese Fragen sind strittig. Während einige Forscher das Alter des ersten »echten« Säugetiers auf 178 Millionen Jahre schätzen, vermuten andere, Mammalia hätten bereits vor 208 Millionen Jahren gelebt. Ein Großteil der jüngsten Fossilfunde setzt sich aus Vertretern lange ausgestorbener Gruppen zusammen, die sich bereits von der Stammbaumlinie getrennt hatten, bevor die drei Gruppen der heutigen Säuger entstanden.



ILLUSTRATIONEN: DAVIDE BONADONNA, MICROBATIUM FÜR SCHILBERUM & HÄHNCHENSCHLEIER NACH MENG, Q., ET AL., NEW CLADING MAMMALIAFORMAS FROM THE JURASSIC, NATURE 548, 2017; MICRODOCODON, GRACILIS & SAUBER LUND SCHLICKEN NACH BOU, G.-F. ET AL., NEW JURASSIC MAMMALIAFORMA SHEDS LIGHT ON EARLY EVOLUTION OF MAMMAL-LIKE HYPOD BONES, SCIENCE 365, 2019; REPENOMAMMUS ROBUSTUS NACH HU, M. ET AL., LARGE MESOZOIC MAMMALS FED ON YOUNG DINOSAURS, NATURE 433, 2005; STAMMBAUM NACH LUD, Z.-X., TRANSFORMATION AND DIVERSIFICATION IN EARLY MAMMAL EVOLUTION, NATURE 450, 2007 / DESIGN: WES FERNANDES/NATURE; PICKRELL, J., THE MAKING OF MAMMALS, NATURE 574, 2019

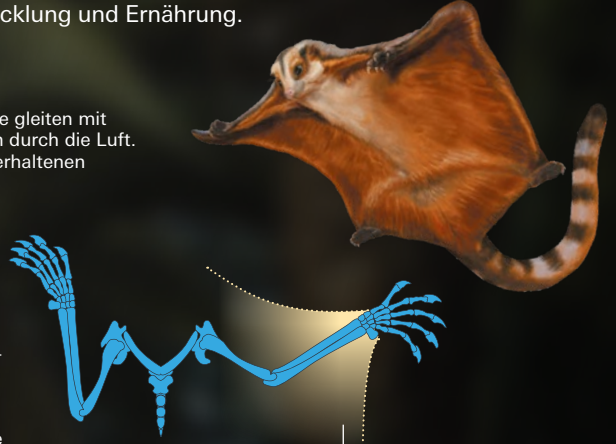


Galerie der Talente

Zahlreiche archetypische Eigenschaften der Säugetiere bildeten sich bereits zu Beginn ihrer Evolution in einem kurzen Entwicklungsschub heraus, darunter auch Neuerungen bei Fortbewegung, Entwicklung und Ernährung.

Himmelsgleiter

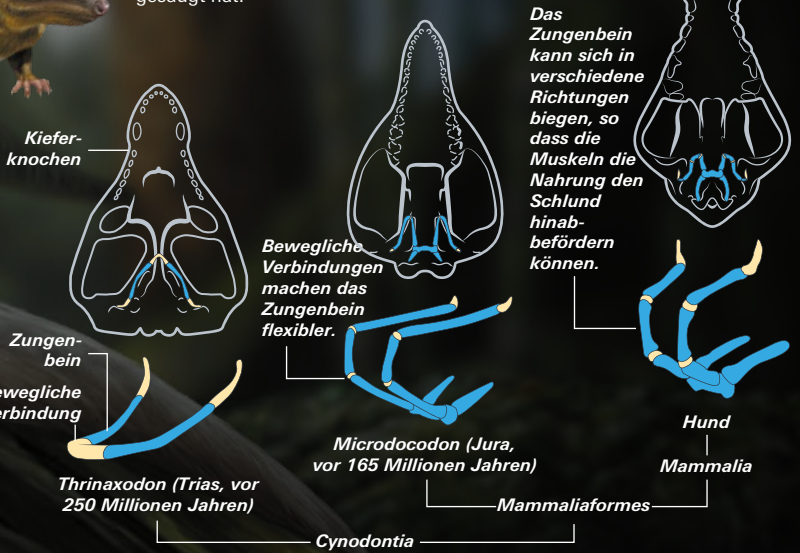
Etliche moderne Säugetiere gleiten mit aufgespannten Hautlappen durch die Luft. Die außergewöhnlich gut erhaltenen pelzigen Flughäute von *Maiopatagium furculiferum* aus dem Jura verraten, dass sich diese Fähigkeit schon sehr früh, vor etwa 160 Millionen Jahren, herausbildete. Das eichhörnchen-große Tier fraß vermutlich Früchte, während andere, gleichzeitig lebende Gleit-säuger Zähne besaßen, die sich besser zum Knacken von Samen eigneten.



Eine fellbedeckte Flughaut spannt sich zwischen Vorder- und Hinterextremitäten auf.

Saugen und Schlucken

Alle Säugetiere füttern ihren Nachwuchs mit Milch; hierfür benötigen die Jungen einen speziellen Rachenknochen. *Microdocodon gracilis* aus dem Jura besaß bereits ein solches Zungenbein, das in seiner Form dem moderner Säuger ähnelt. Demnach handelt es sich bei dem Fossil um den ersten bekannten Vertreter der Säugerartigen, der vermutlich Milch gesaugt hat.



Das Zungenbein kann sich in verschiedene Richtungen biegen, so dass die Muskeln die Nahrung den Schlund hinab-befördern können.

Groß und Klein

Die ersten Säuger traten in unterschiedlichsten Größen und Formen auf: So erreichte der Räuber *Repenomamus* (unten rechts) etwa Dachsgroße, *Liaconodon* (großes Bild) war so groß wie eine Ratte, und die winzige Gattung *Microdocodon* (Mitte rechts) ähnelte einer Wühlmaus.



Liaconodon hui



Hauskatze

Repenomamus robustus 100

Docodonta

Monotremata/Kloakentiere

Eutriconodontia

Multituberculata

Metatheria (einschließlich Marsupialia/Beuteltiere)

Eutheria (einschließlich Placentalia/Plazentatiere)

Dinosaurier zum Abendessen

Arten wie *Repenomamus robustus* aus der Unterkreide stellen unsere stereotype Vorstellung von frühen Säugern als Insekten fressende, flauschige Tierchen in Frage. Der Magen eines 2005 beschriebenen Exemplars der etwa dachs-großen Kreatur hatte es in sich: Knochen eines *Psittacosaurus*-Jungen, eines zweibeinigen, schnabeltragenden Dinosauriers.



Zudem erhellen die Entdeckungen den möglichen evolutionären Ursprung einiger ihrer Schlüsselmerkmale: das Säugen der Jungen, das große Gehirn sowie die ausgesprochen scharfen Sinne.

»Die explosionsartig auftretenden Funde von zahlreichen frühen Säugerformen in den letzten zwei Jahrzehnten, insbesondere aus China, haben uns regelrecht überwältigt«, bekennt David Krause, Wirbeltierpaläontologe am Denver Museum of Nature & Science voller Enthusiasmus. Diese Lawine von Entdeckungen entfachte jedoch auch manche Diskussion. So streiten einige Forscher darüber, welche Fossilengruppen zu den Mammalia gerechnet werden sollten, und hinterfragen den Aufbau des derzeit gültigen Stammbaums. »Wir möchten unsere Frühgeschichte in der Sprache der Evolutionsbiologie verstehen – und das treibt mich an«, erklärt der Paläontologe Zhe-Xi Luo von der University of Chicago. »Das gesamte Gebiet ist so unglaublich interessant, weil die Fossilien datensätze immer besser werden und wir gerade erst damit anfangen, uns mit einigen dieser Fragen konkret auseinanderzusetzen.«

Im Schatten der Saurier

1824 präsentierte der englische Naturforscher William Buckland (1784–1856) den Mitgliedern der Geological Society of London Knochen von *Megalosaurus*, einem der ersten bekannten Dinosaurier. Während seines Vortrags enthüllte der Wissenschaftler auch winzige Kieferknochen von Säugetieren, die an derselben Fossilienlagerstätte ausgegraben worden waren. Ihre Anwesenheit ließ erahnen, dass die Mammalia auf eine sehr lange Geschichte zurückblicken, aber spektakulärer wirkende Dinosaurierfunde stellten solche Entdeckungen oft in den Schatten.

In den nächsten 150 Jahren blieb es bei spärlichen Funden versteinertes Säuger. Doch 1997 präsentierten Forscher den ersten frühen Vertreter der Mammalia aus den fossilienreichen Gesteinen der Provinz Liaoning im Nordosten Chinas – und öffneten mit diesem Fund quasi die Schleusen. Seitdem stieß man dort auf über 50 nahezu vollständige, »wunderschöne Exemplare«, erzählt der Paläontologe Jin Meng vom American Museum of Natural History. Wie im Fall von Dinosaurierknochen hatten einheimische Bauern die versteinerten Säugetiere ausgegraben und an Museen verkauft.

Die Dinosaurier blieben allerdings weiterhin die Stars der Öffentlichkeit, meint Steven Brusatte von der University of Edinburgh. »Erst seit Kurzem kommen die Säugetiere auf Grund der Forschungsarbeiten von Luo, Meng und anderen Wissenschaftlern endlich zu ihrem Recht«, ergänzt der Paläontologe (siehe Spektrum Oktober 2016, S. 42).

Die meisten der aus China stammenden Säugetierfossilien entstanden infolge von Vulkanausbrüchen, bei denen die Tiere unter einer Schicht aus Asche begraben wurden – und zeichnen sich durch ihren besonderen Detailreichtum aus. Während die versteinerten Säuger des Erdmittelalters (vor 252 Millionen bis vor 66 Millionen Jahren) im Allgemeinen aus nicht viel mehr als Zähnen und Kieferbruchstücken bestehen, weisen die chinesischen Exemplare häufig vollständige Skelettstrukturen mit Fell, Haut und inneren Organen auf. »Sie liefern uns sehr viele Einzelhei-



ZHE-XI LUO, UNIVERSITY OF CHICAGO; MENG, D.-J., ET AL.: NEW GLIDING MAMMALIAFORMS FROM THE JURASSIC. NATURE 548, 2017

Eine hervorragend erhaltene Versteinierung von *Maiopatagium furculiferum* offenbart, dass Säugetiere schon vor 160 Millionen Jahren durch die Luft gleiten konnten.

ten, mit denen wir wissenschaftliche Fragen klären können«, sagt Meng, der sich für die Evolution des Säugerohrs interessiert.

Solche Fossilfunde brachten die bis dahin gültige Lehrmeinung ins Wanken. »Wir hatten immer gedacht, dass die in der Blütezeit der Dinosaurier lebenden Säugetiere völlig unspektakulär gewesen seien: kleine, mäuseartige Wesen, die im Schatten der Riesenechsen herumhuschten«, räumt Brusatte ein. Aber diese Tiere »machten damals gerade ihre eigene rasante evolutionäre Entwicklung durch«.

Vor mindestens 178 Millionen Jahren traten die ersten Säuger auf der Erde in Erscheinung und wuselten zwischen den Dinosauriern umher, bis die Mehrzahl Letzterer, mit Ausnahme der Vögel, vor 66 Millionen Jahren ausgelöscht wurde. Die Säugetiere mussten jedoch nicht erst darauf warten, um sich in diverse Formen und Arten zu differenzieren. »Die neuen Enthüllungen dokumentieren eine gewaltige, bisher ungeahnte ökologische Vielfalt«, meint der Paläontologe Richard Cifelli von der University of Oklahoma.

Einige der frühesten Innovationen, die Wissenschaftler anhand der Versteinierungen identifizierten, betrafen die Fortbewegung. So schilderte Mengs Arbeitsgruppe 2006 die Entdeckung des ersten Gleitsäugers: ein Vertreter der 164 Millionen Jahre alten Gattung *Volaticotherium*, die mit Hilfe einer zwischen den Extremitäten aufgespannten

pelzigen Flughaut ähnlich wie heutige Gleithörnchen durch die Luft segeln konnte. 2017 präsentierten Luo und seine Mitarbeiter zwei weitere Gleiter, *Vilevolodon* und *Maiopatagium* (siehe Foto links), die ungefähr zur selben Zeit gelebt hatten und zur Gruppe der so genannten Haramiyida gehörten. Seite an Seite mit den ersten Flugsauriern glitten diese Tiere im Sturzflug von den Bäumen und erschlossen sich so Nahrungsquellen, die für sie sonst unerreichbar gewesen wären.

Die Forscher enthüllten weitere Spezialisierungen, die sich viel früher entwickelt hatten als vermutet: *Agilodocodon* beispielsweise konnte auf Bäume klettern und deren Rinde anknabbern, um so Pflanzensaft zu schlecken; die schnabeltiergroßen Exemplare der Gattung *Castorocauda* schwammen dank ihrer mit Häuten ausgestatteten Füße und ihres biberartigen Schwanzes durch Flüsse; und das an einen Maulwurf erinnernde Wesen *Docofossor* grub mit seinen schaufelartigen Pfoten und Klauen im Boden.

Die damaligen Säugetiere hatten sich eine Vielzahl von Nahrungsspektren erschlossen, die weitaus diverser waren, als Wissenschaftler ursprünglich angenommen hatten. 2014 beschrieb Krauses Arbeitsgruppe den an ein Murmeltier erinnernden Pflanzenfresser *Vintana*, der sich im heutigen Madagaskar vermutlich von Wurzeln und Samenkörnern ernährte. Und der einem Vielfraß ähnelnde Fleischfresser *Repenomamus*, dessen Fossil Mengs Team 2005 vorstellte, wies in seinem Magen sogar die Knochen eines Dinosaurierbabys auf.

Etliche der neu entdeckten Säuger gehörten laut Meng zu längst ausgestorbenen Untergruppen. Im Gegensatz zu der bunten Mischung mesozoischer Säugetiere entstammen die heutigen Mammalia lediglich drei Gruppen: den Plazentatieren (Placentalia), die den größten Artenreichtum aufweisen und zu denen auch wir Menschen zählen; den Beuteltieren (Marsupialia) wie Kängurus und Koalas, die sich durch kurze Tragzeiten im Mutterleib und eine nachgeburtliche Entwicklung in einem Beutel auszeichnen; sowie den Eier legenden Kloakentieren (Monotremata), die heute nur durch das Schnabeltier und einige Ameisenigel repräsentiert werden. »Im Verlauf der Erdgeschichte gab es aber noch zahlreiche andere Gruppen wie zum Beispiel die Multituberculata, die Triconodonta und die Haramiyida«, verdeutlicht Meng. »Tatsächlich waren die im Jura lebenden Säugetiere außerordentlich vielgestaltig.«

Große, stattliche Tiere räumen mit alten Mythen auf

Einige von ihnen, wie etwa der einer Spitzmaus gleichende Insektenfresser *Juramaia*, den Luo und seine Mitarbeiter 2011 beschrieben und auf ein Alter von 160 Millionen Jahre datierten, zählen zu den ersten Plazentatieren und stellen daher potenzielle Vorfahren des Menschen dar. Manche Säugetiere aus der Dinosaurierzeit erwiesen sich zudem als sehr viel größer als zunächst vermutet. So brachte *Repenomamus* 12 bis 14 Kilogramm auf die Waage, während ein waschbärgrößen Exemplar von *Vintana* bis zu neun Kilogramm wog. »Dass wir mit den alten Mythen aufgeräumt haben, nach denen sich die ersten Säuger aus einem sehr einfachen, unspezialisierten Vorfahren entwickelt

haben sollen, ist schon unglaublich spannend«, stellt Luo fest.

Die Fossilfunde beschränken sich jedoch nicht nur auf China. Auch in den USA, Spanien, Brasilien, Argentinien, Madagaskar und der Mongolei kamen bedeutende Versteinerungen zu Tage. Einige der faszinierendsten und ältesten Fossilien – und unsere größten Wissenslücken – offenbaren sich in den südlichen Erdteilen. Dort sind lediglich fünf Gattungen mesozoischer Säuger und ihrer Verwandten bekannt, während man in nördlichen Breiten von mehr als 70 Gattungen weiß. In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurden in Brasilien etliche über 200 Millionen Jahre alte Fossilien aus der Trias geborgen. Laut dem Paläontologen Guillermo Rougier von der University of Louisville stehen jene »unglaublichen Entdeckungen« genau an der Schwelle zwischen den Mammalia und ihren cynodonten Vorfahren. »Diese Formen zeigen tatsächlich eine sehr graduelle Weiterentwicklung von typischen Nichtsäugetieren zu Individuen, die praktisch alle Merkmale ursprünglicher Säuger besitzen.«

»Es sieht immer mehr danach aus, als ob das alles in einem sehr kurzen und plötzlichen Ausbruch evolutionären Experimentierens entstanden ist«

Zhe-Xi Luo, University of Chicago

Die jüngsten Fossilfunde liefern ebenfalls Hinweise auf die Evolution von Schlüsselmerkmalen der Mammalia. Ihr feines Gehör zum Beispiel beruht teilweise auf winzigen Knochen des Mittelohrs: Hammer, Amboss und Trommelfelling (Ectotympanon). Bei den reptilienartigen Säugervorfahren waren diese Knöchelchen jedoch Bestandteile des Kiefers und dienten dem Kauen und nicht dem Hören. Die ersten Vorläufer der Säugetiere, wie etwa die vor 205 Millionen Jahren lebende spitzmausartige Gattung *Morganucodon*, wiesen einen Prototyp der für die Mammalia charakteristischen Anordnung auf, der beide Funktionen in sich vereinte.

2011 beschrieben Meng und seine Kollegen eine Zwischenform: *Liaconodon hui*, eine 120 Millionen Jahre alte Spezies aus China, die zur Säugergruppe der Eutriconodonta gehörte (siehe Foto S. 36/37 und »Markenzeichen der Säugetiere«, S. 38/39). Bei dem rattengroßen Fossil ließen sich drei Mittelohrknochen ausmachen, die aber durch eine Knorpelspanne mit dem Kiefer verbunden waren. »Hör- und Kaufunktion waren noch nicht komplett voneinander getrennt«, erklärt der Paläontologe – ein handfester Beweis für den evolutionären Übergang vom Kiefer zum Ohr.

Eine weitere spezifische Eigenschaft von Säugetieren ist die ausgeklügelte Art und Weise, in der sie ihre Nahrung kauen und in kleinen Stücken hinunterschlucken, statt ihre

Beute als Ganzes zu verschlingen, wie es etwa Schlangen oder Alligatoren tun. Möglich wurde das den Mammalia durch ein breites Spektrum an komplexen Zähnen, mit deren Hilfe sie ihre Nahrung abbeißen und zermahlen konnten.

Säugetierjunge ernähren sich allerdings ganz anders – mit Muttermilch. »Unsere gesamte Gruppe wurde nach dieser unglaublichen biologischen Innovation benannt«, konstatiert Luo. Das Trinken von Milch wird durch die Fähigkeiten des Saugens und Schluckens ermöglicht, unterstützt vom Zungenbein im hinteren Teil des Rachens und den mit ihm verknüpften Muskeln. Diese Strukturen sind auch an der Bildung des Kehlkopfs beteiligt.

Saugen wie ein Säugetier

2019 präsentierten die Forscher um Luo den Fund eines 165 Millionen Jahre alten wühlmausgroßen Docodonten, eines nahen Verwandten der echten Säuger: *Microdocodon gracilis* verfügte über ein vollständig erhaltenes Zungenbein und ist demnach die erste bekannte Art, die wie ein modernes Säugetier saugen konnte.

Nur selten blieben jedoch solche Details erhalten, und die Erkenntnisse zur Entwicklung von Ohr- und Rachenknochen seien – ähnlich wie beim *Kayentatherium*-Nachwuchs – ohne die technischen Fortschritte in der Mikrocomputertomografie nicht möglich gewesen, räumt Krause ein. Das Verfahren enthüllte außerdem weitere Einzelheiten bezüglich des Riechvermögens und des Gehirns früher Säugetiere. Die Erkenntnisse »füllen diese frühen Säugerfossilien in einer Art und Weise mit Leben, die uns vorher nahezu unvorstellbar erschien«, ergänzt der Paläontologe.



FOTOLIA / HLP/PHOTO

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

Möglicherweise entwickelte sich ein Großteil der säugetiertypischen Merkmalskonstellationen – ein komplexes Gebiss, scharfe Sinne, das Säugen der Jungen, wenige Nachkommen – sogar schon vor der Entstehung der ersten Säuger, und das sehr schnell. »Es sieht immer mehr danach aus, als ob das alles in einem sehr plötzlichen Ausbruch evolutionären Experimentierens entstanden ist«, mutmaßt Luo. Zu jener Zeit, als die säugetierähnlichen Wesen die Welt des Erdmittelalters durchstreiften, »besaß diese Tiergruppe bereits ihr modernes Aussehen und die entsprechenden biologischen Anpassungen«, betont der Wissenschaftler.

Obwohl sich die Experten in vielen Punkten einig sind, werden nach wie vor heftige Diskussionen darüber geführt, in welcher Verwandtschaftsbeziehung die ältesten Vertreter der Mammalia zueinander stehen und welche Gruppen den »echten« Säugetieren zuzurechnen sind. Das führe zu

Unsicherheiten, was den zeitlichen Ablauf der Evolution der Schlüsselmerkmale angeht, gibt Hoffman zu bedenken.

Ein Zankapfel zwischen Meng und Luo, die jeweils unterschiedliche evolutionäre Stammbäume aufgestellt haben, ist die Einordnung der Haramiyida. Während Meng den Standpunkt vertritt, dass die Gruppe zu den Mammalia gezählt werden müsse, ist Luo davon überzeugt, es handle sich um einen Seitenzweig. Die frühesten bekannten Haramiyiden stammen aus der Trias und sind 208 Millionen Jahre alt. Sollten es Mammalia sein, reichen deren Ursprünge bis mindestens in diese Zeit zurück – wenn nicht, trat das älteste Säugetier erst im Jura vor 178 Millionen Jahre auf.

Weitere Fossilfunde, die zum Teil noch unbearbeitet in den Lagern der Forscher schlummern, könnten derartige Fragen beantworten – und gleichzeitig für neue Überraschungen sorgen. Dabei stehen viele Dinge auf der Wunschliste der Paläontologen wie zum Beispiel das Wachstum: Bei Reptilien verläuft es während ihres gesamten Lebens langsam; Säugetiere dagegen erfahren in ihrer Jugend einen Wachstumsschub, bis sie schließlich ihre endgültige Körpergröße erreichen. Um dieses Phänomen genauer verfolgen zu können, bräuchten die Wissenschaftler eine Fossilienserie, die vom Jugendstadium bis zum adulten Tier reicht. »Es ist eins der entscheidendsten Säugetiermerkmale, die unsere Biologie maßgeblich bestimmen«, erklärt Luo.

Meng hegt einen anderen Traum: »Ein Gedanke lässt mich nicht mehr los: Eines Tages finde ich ein Säugetierskelett, in dem noch ein anderes, sehr viel feineres Knochengerüst steckt, das entweder einem ungelegten Ei entstammt oder sogar zu einem Fötus gehört – was weit aus interessanter wäre.«

Die Flut von Entdeckungen zeigt, dass jeder neue Fossilfund der Evolutionsgeschichte ein neues Kapitel hinzufügen oder gängige Vorstellungen komplett über den Haufen werfen kann. »Tatsächlich befinden wir uns gerade in einer aufregenden, ja fast manischen Phase, in der Unmengen neuer Indizien über uns hereinbrechen«, sagt Brusatte, »und es wird eine gewisse Zeit dauern, bis wir all diese Erkenntnisse sinnvoll miteinander verknüpft haben.« ◀

QUELLEN

Hoffman, E.A., Rowe, T.B.: Jurassic stem-mammal perinates and the origin of mammalian reproduction and growth. *Nature* 561, 2018

Luo, Z.-X. et al.: New evidence for mammaliaform ear evolution and feeding adaptation in a Jurassic ecosystem. *Nature* 548, 2017

Meng, Q.-J. et al.: New gliding mammaliaforms from the Jurassic. *Nature* 548, 2017

Zhou, C.-F. et al.: New Jurassic mammaliaform sheds light on early evolution of mammal-like hyoid bones. *Science* 365, 2019

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 574, S. 468–472, 2019



© SkyLine-stock.adobe.com

Was nun?
Die Herausforderungen
des **Klimawandels**
im Spiegel der Wissenschaft

Symposium 2020

7. Oktober

Bonn



Weitere Informationen und Anmeldung unter:
www.dhvseminare.de/symposium_2020

**DEUTSCHER
HOCHSCHUL
VERBAND**

PATENTE NATUR ALS »ERFINDUNG«

Lassen sich gewerbliche Schutzrechte auf Lebewesen oder Naturprodukte erteilen? Das ist seit mehr als 100 Jahren ein Streitthema. Die rasanten Fortschritte in den Lebenswissenschaften verschärfen diese Debatte noch.



NICOLE MEYERER

Tobias Ludwig ist Wissenschaftsjournalist und -kommunikator in Leipzig.

» [spektrum.de/artikel/1752444](https://www.spektrum.de/artikel/1752444)

Patente auf Saatgut: Muss sich der Umgang damit ändern? Kritiker befürchten eine Monopolisierung des Markts.

AUF EINEN BLICK JURISTISCH-PHILOSOPHISCHES MINENFELD

- 1** Schon im 19. Jahrhundert wurden Patente auf Organismen erteilt – begleitet von Auseinandersetzungen darüber, ob Produkte der Natur überhaupt patentfähig seien.
- 2** In der Landwirtschaft sind Patente besonders umstritten. Kritiker sagen, gewerbliche Schutzrechte auf Saatgut förderten die Monopolisierung im Agrarsektor.
- 3** Die Fortschritte in den Lebenswissenschaften führen zu bedeutenden medizinischen Innovationen. Das hat neue Patentanträge zur Folge, mit denen oft schwierige ethische Fragen einhergehen.

► Patente sind Schutzrechte auf technische Erfindungen. Im europäischen Rechtskreis werden sie nur auf Produkte oder Verfahren erteilt, die neu aus einer erfindnerischen Tätigkeit hervorgegangen und technisch anwendbar sind. So weit, so verständlich. Denkt man nun an Patente auf Lebewesen oder biologische Substanzen und Verfahren, erschließt sich mitunter nicht sofort, inwiefern es sich dabei um menschliche Erfindungen handelt. Dieses Dilemma und die ethischen Fragen, die sich mit gewerblichen Schutzrechten auf die Natur verbinden, führen seit jeher zu schwierigen Diskussionen. Innovationen wie die CRISPR-Cas-Methode fachen den Streit nun neu an.

Patente auf Dinge, bei denen es sich im weitesten Sinne um bio(techno)logische Erfindungen handelt, gibt es schon seit erstaunlich langer Zeit. Bereits im Jahre 1873 ließ der Mikrobiologe Louis Pasteur (1822–1895) sein verbessertes Verfahren zur Herstellung von Hefekulturen sowohl in Frankreich (Patent 98476) als auch in den Vereinigten Staaten (US Patent No. 141072A) als Patent eintragen. Es gilt als historisch erstes gewerbliches Schutzrecht auf einen Mikroorganismus. Doch bereits kurz nachdem es erteilt worden war, gelangte man in den USA zu der Einsicht, dass isolierte und gereinigte Formen eines natürlich vorkommenden Stoffs oder Lebewesens nicht patentfähig sein sollten, da es sich bei diesen um Produkte der Natur handle. Die so genannte Product-of-Nature-Doktrin war geboren.

Da die Begriffe »Isolation« und »Reinigung« aber oft eng ausgelegt wurden, ließ sich mittels Filtrieren und Erhitzen eines Naturprodukts vielfach trotzdem eine patentfähige Substanz erzeugen. Dies zeigen beispielsweise ein Patent auf Muschelsaft (US-Patent Nr. 395199 von 1888), einen Extrakt aus gekochten und filtrierten Muscheln, sowie ein Schutzrecht auf die aktiven Bestandteile der Schafsschilddrüse (US-Patent Nr. 616501 aus dem Jahr 1898). In einem Wechselspiel teils widersprüchlicher gerichtlicher Entscheidungen loteten Juristen in den folgenden Jahrzehnten immer wieder neu aus, in welcher Form die Natur dem Patentschutz zugänglich sein soll. Ein Prozess, der bis heute andauert.

Im Bereich der Saatgutpatente ist diese Debatte besonders heftig. Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts gab es erste Versuche, gewerbliche Schutzrechte auf Saatgut und auf Züchtungsverfahren von Nutzpflanzen zu erlangen. Sie hatten zunächst keinen Erfolg. »Der große Paradigmenwechsel kam nach dem Zweiten Weltkrieg«, schildert Eva Gelinsky von der Interessengemeinschaft für gentechnikfreie Saatgutarbeit (IG Saatgut), die sich für eine nachhaltige Landwirtschaft einsetzt und Patente auf Saatgut und andere Lebewesen ablehnt. Bereits ab den 1930er Jahren, so Gelinsky, sei diskutiert worden, ob die private Organisation der Züchtung mit einem Patentschutz der richtige Weg sei. In den 1950er und 1960er Jahren habe man sich dann stärker zu Gunsten von Privatunternehmen ausgerichtet und die rechtlichen Rahmenbedingungen entsprechend angepasst. »Patente werden ja eigentlich auf technische Erfindungen erteilt, und man sollte grundsätzlich fragen, ob Lebewesen – also Pflanzen, Tiere – überhaupt technische Erfindungen des Menschen sein können«, meint Gelinsky. »Heute beför-

dern Patente sehr wesentlich die Konzernkonzentration auf dem Saatgutmarkt.«

Tatsächlich teilen immer weniger Firmen diesen bedeutenden Markt unter sich auf. Der 2017 von der Heinrich-Böll-Stiftung, der Rosa-Luxemburg-Stiftung und der Umweltschutzorganisation »Friends of the Earth« veröffentlichte Agrifood-Atlas stellt fest, dass mittlerweile nur noch drei riesige Fusionskonzerne den Saatgut- und Agrochemiemarkt dominieren, nämlich Bayer-Monsanto, Dow-DuPont und ChemChina-Syngenta. Angesichts der damit einhergehenden gewaltigen Macht einzelner Unternehmen würden Patente immer stärker dazu genutzt, gezielt Claims abzustecken und das Vordringen von Mitbewerbern zu unterbinden, sagt Gelinsky.

Finanzielle Absicherung

Eine Einschätzung, der Jörg Thomaier, Leiter Intellectual Property bei der Bayer-Gruppe, im Prinzip nicht widerspricht: »Ich bezeichne Patente immer ganz gerne als das Herzstück, den Kern, des Werts unseres Unternehmens, weil darauf unser Geschäftsmodell aufbaut.« Patente seien eine Art Sicherheit dafür, dass getätigte Aufwendungen für Forschung und Entwicklung durch das zwischenzeitliche Vermarktungsmonopol wieder eingespielt werden und somit Innovationen überhaupt vorangetrieben werden können. Der Ansicht, Patente seien per se monopolfördernd und der Markt unter wenigen großen Konzernen aufgeteilt, will Thomaier jedoch nicht zustimmen: »Es gibt eine ganze Menge Saatgutanbieter und alles, was an Saatgut patentfrei ist, kann von allen genutzt werden. Das ist die gigantische Mehrheit, denn alles, was älter als 20 Jahre ist, kann nicht mehr patentgeschützt sein. Das Monopol ist zeitlich und inhaltlich beschränkt.«

Die IG Saatgut sieht in Schutzrechten, wie Bayer sie anstrebt, allerdings ein Innovationshemmnis und kritisiert die alleinige Ausrichtung auf Profitabilität. Gelinsky betont:

Goldener Reis ist zwar patentiert, kann aber laut der Herstellerfirma lizenzfrei angebaut werden.



Patente auf Schimpansen zurückgenommen

Im Juli 2020 hat das Europäische Patentamt (EPA) zwei Patente auf gentechnisch veränderte Menschenaffen für ungültig erklärt. Tier- und Umweltschutzorganisationen hatten in einem jahrelangen Rechtsstreit gegen die Patente der US-Firma Intrexon (heute Precigen) gekämpft und damit schließlich Erfolg.

Die Technische Beschwerdekammer des EPA beurteilte die Ansprüche auf Schimpansen und andere Tiere als nicht patentfähig. Gewerbliche Schutzrechte auf die genetische Veränderung von Tieren seien ausgeschlossen, wenn daraus Tierleid resultiere, ohne dass ein wesentlicher medizinischer Nutzen für den Menschen oder das Tier vorliege.

Konkret ging es um Schimpansen, in deren Erbgut Gene eingefügt werden, die aus Schmetterlingen stammen. Jene Erbanlagen

dienen als Genschalter, da sich ihre Aktivität durch Zugabe bestimmter chemischer Substanzen beeinflussen lässt. Entsprechend veränderte Affen sollten etwa zur Entwicklung von Krebstherapien genutzt werden. Die auf sie erteilten Patente (EP1456346 und EP1572862) gelten nun nicht mehr in der vorherigen Form. Die Ansprüche auf die Tiere sind gestrichen – der Anspruch auf die Art der Genveränderung könnte allerdings bestehen bleiben, wie das EPA betonte. Darüber werde noch entschieden.

Laut der Organisation »Testbiotech« hat das EPA in den zurückliegenden Jahrzehnten hunderte Patente auf Versuchstiere erteilt, ebenso auf Nutztiere wie Kühe und Schweine. Tier- und Umweltschutzorganisationen kritisieren das; einige fordern ein vollständiges Verbot derartiger gewerblicher Schutzrechte. Mit dem jetzt gefällten Ur-

teil des EPA sollten ihrer Ansicht nach wenigstens Patente auf landwirtschaftlich genutzte Tiere der Vergangenheit angehören, da hier keinerlei medizinischer Nutzen zu erwarten sei.

1992 wurde in Europa erstmals ein Patent auf einen Säugetierorganismus erteilt, nämlich auf die »Harvard-Krebsmaus«. Diese gentechnisch veränderten Mäuse neigen dazu, an Tumoren zu erkranken, und sollten als Modellorganismen für die Onkologie dienen. Ihre Bedeutung für die medizinische Forschung blieb allerdings gering.

Frank Schubert ist Redakteur bei **Spektrum**.

dpa/spektrum.de

Pressemitteilung von Testbiotech, 02.07.2020

Mitteilung von Meyer-Dulheuer MD Legal Patentanwälte PartG mbB, 03.07.2020

»Die Folge ist, dass immer mehr Patente angemeldet werden, und es besteht die Möglichkeit, dass die Konkurrenz vom Patentinhaber keine Lizenz bekommt. Dann können Mitbewerber in einem bestimmten Bereich möglicherweise nicht weiterarbeiten. Es kann vorkommen, dass Lizenzen zu Konditionen angeboten werden, die für Konkurrenten nicht tragbar sind, etwa weil zu teuer«. Zudem seien die Konzerne, die den Saatgutmarkt dominieren, zugleich Chemieunternehmen, die bevorzugt Saatgut zusammen mit einem dazu passenden Pflanzenschutzmittel verkaufen – beispielsweise glyphosatresistente Sojabohne gemeinsam mit Glyphosat. Eine Praxis, die laut Gelinsky zu massiven Umweltschäden geführt hat.

Gelinsky sieht in Patenten zwar nicht die alleinige Ursache solcher Probleme, doch sie ist überzeugt, die Handhabung von Schutzrechten fördere diverse Missstände, wie die Verarmung der Biodiversität. Thomaier widerspricht: »Zum einen hat das Patentrecht eine Ausnahmeklausel, die so genannte Research Exemption, die derzeit außer in den USA in allen Jurisdiktionen existiert. Das bedeutet, dass jeder da draußen meine Erfindung nehmen und sie weiterentwickeln kann. Er darf nur seine Erfindung, die auf meiner aufbaut, nicht vermarkten. Zum anderen ist das Interesse an einer hohen Biodiversität auch bei uns gegeben.« An dem Verlust der Artenvielfalt schuld sei eine Landwirtschaft, die zuvorderst auf Produktivität und Effizienz ausgerichtet sei, und nicht Patente auf Pflanzen oder Herbizide.

Das sei eine grundsätzliche Frage von gesamtgesellschaftlicher Relevanz; ein Verbot von Schutzrechten auf Pflanzen sei nicht die Lösung.

In welcher Form sind solche überhaupt zulässig? Zunächst können tatsächlich nur Pflanzen patentiert werden, keine Pflanzensorten. Ein Beispiel: Züchter A verändert Mais gentechnisch derart, dass dieser einen Giftstoff des Bodenbakteriums *Bacillus thuringiensis* produziert und infolgedessen vor Insektenfraß geschützt ist. Patentieren kann der Züchter nun Mais mit der Eigenschaft »Insektenresistenz«. Die daraus abgeleiteten Sorten an sich sind nicht patentfähig. Züchter B dürfte zwar mit einer Sorte von Züchter A weiterzuchten, seine Kreation jedoch nicht auf den Markt bringen, solange es sich dabei um eine Maispflanze mit der von Züchter A patentierten Eigenschaft handelt.

Patentierbar oder nicht?

Da das Züchtungsverfahren in dem Beispiel auf Gentechnik beruht, kann Züchter A sowohl die Pflanze als auch das Verfahren selbst patentieren. Hätte er allerdings eine konventionelle Zuchtmethode wie Kreuzung und Selektion genutzt, wäre sie nicht patentfähig, da sie »im Wesentlichen biologisch« ist. Und hier liegt der Knackpunkt: Im Europäischen Patentübereinkommen sind Ausnahmen von der Patentierbarkeit explizit geregelt. Das heißt, alles was nicht ausgeschlossen ist, ist patentfähig. Demnach sind zwar »im Wesentlichen biologische« Züchtungsverfahren dem Pa-

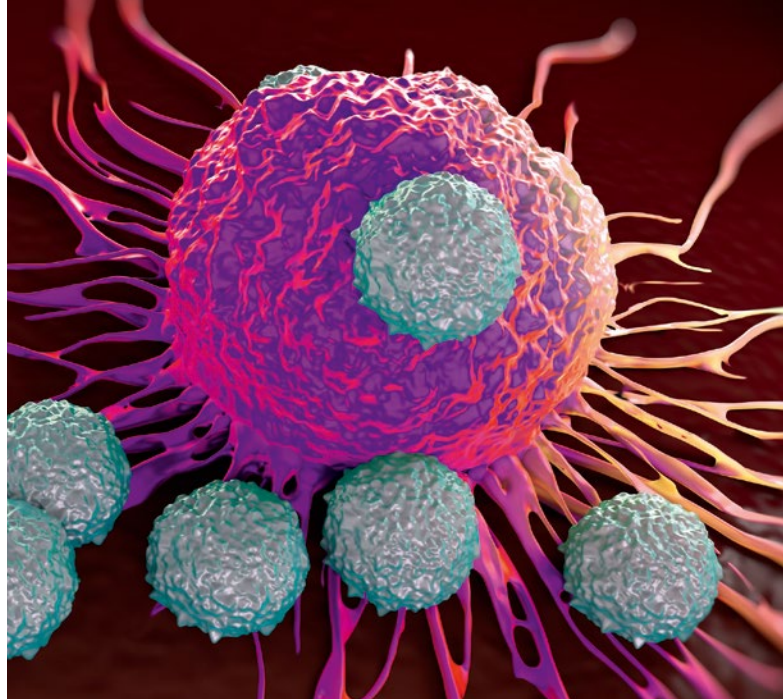
tenschutz nicht zugänglich, die daraus resultierenden Pflanzen mit bestimmten Eigenschaften aber schon. An diesem Umstand entzündete sich 2015 ein Streit, der bis heute andauert und mittlerweile die Politik beschäftigt.

Der Disput begann mit einer Entscheidung der Großen Beschwerdekammer, der höchsten juristischen Instanz des Europäischen Patentamts (EPA). Diese hatte bestimmte Schutzrechtsansprüche der Firmen Syngenta und Unilever zugelassen (Entscheidungen »Brokkoli II, G2/13« und »Tomate II, G2/12«) und damit faktisch den Weg frei gemacht zur Patentierung konventionell gezüchteter Pflanzen. Der Beschluss zog eine heftige Debatte nach sich. »Im Hintergrund steht die ethische Frage, ob konventionell gezüchtete Pflanzen dem Patentschutz zugänglich sind; faktisch geht es jedoch um die Unabhängigkeit der Beschwerdekammern des EPA«, erklärt Ulrich Storz, Patentanwalt bei der Kanzlei Michalski, Hüttermann & Partner. Aus einer eigentlich rein juristischen Frage entwickelte sich ein emotional aufgeheizter, politischer Disput.

Selbst das Europäische Parlament sah sich in dem Fall veranlasst, die Europäische Kommission um eine Stellungnahme zu bitten. Das führte laut Storz zu einer Kompetenzüberschreitung: »Die Europäische Kommission teilte mit, aus ihrer Sicht sei das Ansinnen der Biopatentrichtlinie gewesen, [konventionell gezüchtete] Pflanzen vom Patentschutz auszuschließen. Meines Erachtens hat sich die Kommission als Organ der Exekutive damit zur Interpretation rechtlicher Normen geäußert, was nach dem Prinzip der Gewaltenteilung der Judikative obliegt.« Auf die Aussage der Kommission hin habe sich der Präsident des EPA gezwungen gesehen, die Regeln des Europäischen Patentübereinkommens anzupassen. Regel 28, die Ausnahmen von der Patentierbarkeit beschreibt, erhielt einen zusätzlichen Absatz, der die Patentierung konventionell gezüchteter Pflanzen explizit ausschließt – und das trotz anders lautender Entscheidung der Beschwerdekammer.

»Der Präsident des EPA hat damit dem Votum eines Exekutivorgans Folge geleistet, das eigentlich keine Befugnis hat, über europäisches Patentrecht zu votieren«, macht Storz die Tragweite des Falls deutlich. »Damit hat er die Rechtsprechung seiner eigenen Beschwerdekammer ignoriert.« Der Konflikt betraf somit nicht mehr nur den Umgang mit Patenten, sondern auch die Verfassung, weil hier Exekutive und Judikative aneinandergerieten. Unterdessen schuf die technische Beschwerdekammer des EPA Fakten und setzte, nach Beschwerde von Syngenta, die gerade erst geänderte Regel 28 im Dezember 2018 außer Kraft, da sie im Widerspruch zu Artikel 53b stehe, der ebenfalls Patentausschlüsse regelt. Eine Klärung des Konflikts steht aus.

Davon unbenommen herrscht weiterhin die Ansicht vor, dass gentechnisch veränderte Pflanzen dem Patentschutz zugänglich seien. Das gilt auch für Produkte, die mit Hilfe des Genome-Editing-Verfahrens CRISPR-Cas erzeugt wurden. Doch aus der Nutzung dieser Technologie ergeben sich verschiedene rechtliche Probleme, wie Storz erläutert: »Eingriffe mit CRISPR-Cas hinterlassen oft keine Spuren, die das Produkt unterscheidbar machen von einem Erzeugnis, das mit anderen Methoden hergestellt worden ist«



ISTOCK/ROYALTYSTOCKPHOTO

Bei einer CAR-T-Zell-Therapie werden körpereigene Immunzellen künstlich »scharf geschaltet«, um Krebszellen zu bekämpfen. Auch um dieses Verfahren gab es bereits einen Patentstreit.

(siehe »Spektrum« April 2020, S. 12). Dies führe zu zivilrechtlichen Schwierigkeiten, da in einem Patentverletzungsverfahren die Beweislast beim Beklagten liege. So müsse ein Züchter, bei dem eine Pflanze mit einer patentierten Eigenschaft aufgefunden werde, nachweisen, dass dieses Merkmal auf eine zufällige Mutation zurückgeht und nicht auf eine gezielte gentechnische Manipulation. »Gen-Knockouts beispielsweise führen Züchter klassischerweise mit Bestrahlung oder chemischer Behandlung herbei – beides erfolgt zufallsbestimmt. Man kann sie aber auch zielgerichtet mit CRISPR-Cas erzeugen, indem man Erbanlagen damit spezifisch deaktiviert.« Produkte, die mit diesen verschiedenen Methoden hergestellt worden sind, lassen sich oft nicht voneinander unterscheiden – ein ungelöstes Dilemma.

Publikation aus ethischen Gründen abgelehnt

Immer mehr Forscher und Entwickler nutzen CRISPR-Cas, nicht nur im Agrarbereich. Gut in Erinnerung sein dürfte die weltweite Empörung, als der chinesische Biophysiker He Jiankui Ende 2018 auf YouTube verkündete, er habe mit Hilfe dieses Verfahrens bei menschlichen Zwillingen einen vorgeburtlichen Eingriff ins Erbgut vorgenommen und die Kinder damit immun gegen HIV gemacht. Die vermeintlichen Ergebnisse seiner Arbeit sind nie in einem peer-reviewten Journal erschienen, unter anderem, weil die Zeitschriften »Nature« und »JAMA« eine Publikation aus ethischen Gründen ablehnten. Mittlerweile ist He in China zu drei Jahren Gefängnis und einer Geldstrafe von umgerechnet 380 000 Euro verurteilt worden. Sein Fall ist ein besonders krasser, wirft aber ein Schlaglicht auf den enormen Erkenntniszuwachs in der medizinischen Genetik – der schon bald mit vielen neuen Patentanmeldungen in diesem Bereich rechnen lässt. Im Hinblick auf Hes Versuche wäre die Entscheidung jedoch klar, betont Christine Godt, Professorin

für europäisches und internationales Wirtschaftsrecht an der Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg: »Im Patentrecht steht, Patente würden insbesondere nicht erteilt für Verfahren zur Veränderung der genetischen Identität der Keimbahn des menschlichen Lebewesens – und das fällt darunter.« Die Reaktion der Weltöffentlichkeit habe gezeigt, dass Keimbahneingriffe wie die von He vorgenommenen nicht gewünscht seien. Gelänge es damit aber, Menschen dauerhaft von schweren Erbkrankheiten zu heilen, sei fraglich, ob die Öffentlichkeit bei diesem klaren Veto bliebe.

Bisher habe es nur wenige Versuche gegeben, gentherapeutische Verfahren zu patentieren, sagt die Expertin für Wirtschaftsrecht. Eine der seltenen Ausnahmen ist die Gentherapie »Kymriah«. Dabei handelt es sich um eine Methode, um körpereigene Immunzellen mittels Gentechnik so zu verändern, dass sie deutlich effektiver gegen Krebszellen vorgehen (siehe »Spektrum« Oktober 2017, S. 34). Die Therapie ist zur Behandlung von Krebserkrankungen des Blut bildenden Systems zugelassen; im Idealfall reicht eine Anwendung, um die Krankheit zu besiegen. Entwickelt hat das Verfahren der US-Immunologe Carl June von der University of Pennsylvania. Der Schweizer Pharmakonzern Novartis sicherte sich 2012 die Exklusivrechte an der Vermarktung und beteiligte sich an den notwendigen klinischen Studien. Das Präparat wurde 2017 in den USA und 2018 in Europa zugelassen. Im Zuge dessen hatte Novartis beim EPA ein Patent für Kymriah beantragt.

Nach einer Beschwerde der Nichtregierungsorganisationen »Public Eye« und »Médecins du Monde«, laut der es sich bei Kymriah um eine medizinische Dienstleistung handle und nicht um ein Medikament, zog Novartis Ende 2019 den Patentantrag zurück. »Public Eye« zufolge war es das erste Mal, dass dies bei einem europäischen Pharmapatent auf Druck einer NGO geschah. Novartis ließ verlauten, das beantragte Schutzrecht sei für die Weiterentwicklung von Kymriah nicht essenziell und die Therapiemethode bereits ausreichend geschützt. Die beiden NGOs hatten ihre Beschwerde unter anderem mit dem hohen Preis von mehr als 300 000 Euro pro Behandlung begründet sowie mit einer drohenden Monopolisierung im Bereich der Gentherapie, sollte Kymriah patentiert werden. Die ethische Brisanz vieler Verfahren der medizinischen Gentechnik wird künftig sicher zu weiteren Auseinandersetzungen führen.

Welches Ausmaß solche Konflikte annehmen können, zeigt die Kontroverse um Myriad Genetics, die 1994 begann. Das US-Unternehmen hatte für zwei bestimmte Geneorte, die mit der Ausbildung von Brustkrebs in Zusammenhang stehen, Patente angemeldet. Myriad argumentierte, durch eine Untersuchung von Mutationen in den Genen *BRCA1* und *BRCA2* sei es möglich, Brustkrebsrisikopatienten sicher zu identifizieren. Wie mittlerweile aber bekannt, bedeuten Mutationen in diesen Erbanlagen keineswegs, dass sich mit Gewissheit eine Krebserkrankung ausprägen wird. 2001 bekam Myriad Genetics vom EPA ein Patent auf *BRCA1*, was internationale Proteste diverser Organisationen nach sich zog. Das EPA widerrief seine Entscheidung drei Jahre später, gab aber einem neuen Patentantrag im Jahr 2008 statt. In den USA erteilte das dortige Patentamt bereits Mitte der 1990er Jahre mehrere Schutzrechte unter

anderem auf die isolierten DNA-Sequenzen beider Gene. In der Folge fiel Myriad Genetics durch aggressive Lizenzierungspolitik auf und verlangte, dass alle Proben, die auf *BRCA*-Mutationen getestet werden sollen, direkt in die Firmenzentrale nach Utah geschickt werden. Eine solche Untersuchung kostete wegen der Lizenzgebühren zwischen 2400 und 3500 Dollar. Darüber hinaus untersagte Myriad Genetics anderen Forschungseinrichtungen, alternative Diagnoseverfahren für Mutationen in den Genen anzubieten.

Entscheidung des obersten Gerichts beendet Diskussion

Die Diskussion, ob man in der Natur vorkommende Gene überhaupt patentieren könne, flammte nach der Patenterteilung an Myriad Genetics wieder auf. 2009 reichte ein Zusammenschluss aus drei Forschungsverbänden beim US Supreme Court Klage gegen die Myriad-Patente ein. Die Entscheidung fiel 2013, wie Godt erläutert: »Der Supreme Court hat nur jene Patente entzogen, die sich direkt auf die natürliche DNA-Sequenz beziehen, welche auch abgelesen wird. Die komplementäre DNA (cDNA), die im Labor aus der mRNA erzeugt wird, bleibt als technisch-künstliches Objekt patentierbar. Insofern ist der Patentierung von Genen, die in der Natur vorkommen, ein Riegel vorgeschoben worden.« Als das Urteil fiel, sei die Sequenzierung von Genen bereits eine Standardtechnik gewesen und Gensequenzen nicht mehr als Ergebnis einer erfinderischen Tätigkeit betrachtet worden. Der Supreme Court habe somit die Diskussion um die Product-of-Nature-Doktrin öffentlichkeitswirksam beendet, die in den Patentämtern zu jenem Zeitpunkt bereits längst abgeschlossen gewesen sei.

Biopatente werden weiterhin heftig umstritten bleiben, denn wo wirtschaftliche Interessen und moralische Erwägungen zusammenprallen, kommt es zu Konflikten. Die Geschichte zeigt aber, dass sich die Öffentlichkeit aktiv und teils auch erfolgreich in den Patenterteilungsprozess einmischen kann. Hier hilft allerdings kein Schwarz-Weiß-Denken, wie Godt zusammenfasst: »Wir kommen mit der Ja-Nein-Frage, ob Patente erteilt werden sollen oder nicht, nicht unbedingt weiter. Künftige Generationen müssen sich damit befassen, wie der Schutzbereich definiert werden soll, und dafür brauchen wir Regeln.« Besonders angesichts der raschen Entwicklungen in der Gentechnik und im Genome Editing sollten diese Regeln formuliert sein, bevor eine neue Welle von Patentanträgen anbrannt. ◀

QUELLEN

Beauchamp, C.: Patenting nature: A problem of history. *Stanford Technology Law Review* 16, 2013

Cohen, J.: Surprise patent ruling revives high-stakes dispute over the genome editor CRISPR. *Science* 2019, doi: 10.1126/science.aay5343

Demers, L.: Product of nature doctrine: myriad's effect beyond nucleic acids. *SSRN*, 2013. doi: 10.2139/ssrn.2279754

Godt, C.: Bio-Patente in der Medizin. Zur Bedeutung der Auseinandersetzungen um »Myriad« und »Brüstle«. In: *Medizinrecht – Ein Balanceakt zwischen Können und Dürfen*. Mohr Siebeck, Tübingen 2015



Bei welchem Händler finde ich meine Lieblingszeitschrift?



1. Zu **mykiosk.com** gehen
2. Ort eingeben
3. Zeitschrift eingeben
4. Händler finden



mykiosk.com

DER SCHNELLSTE WEG ZU UNSEREN ZEITSCHRIFTEN



FRANZ SCHÄDEL (GERMAN FREISTETTER DE PRESSE) / CC BY-SA 4.0 (REACTICOMMONS ORIGINALS/PS-SA/4.0/LEGAL/DDEI)

FREISTETTERS FORMELWELT RATIONAL ODER IRRATIONAL?

Inzwischen kennt man Milliarden Stellen der Euler-Mascheroni-Zahl, doch das hilft bei der Antwort auf die eigentliche Frage kein Stück weiter.

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

► spektrum.de/artikel/1752456

Am 11. März 1734 veröffentlichte der Schweizer Mathematiker Leonhard Euler ein Werk mit dem Titel »De progressionibus harmonicis observationes«. Darin findet sich unter anderem eine Zahl, die Euler in seinem Text als $C = 0,577218$ angibt. Inzwischen ist sie unter dem Namen Euler-Mascheroni-Konstante bekannt – und birgt noch heute einige Geheimnisse. In moderner Form lässt sie sich wie folgt definieren:

$$\gamma = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n \right)$$

Die Formel sieht kompliziert aus, ist aber gar nicht so schwer zu verstehen. Das große Summenzeichen definiert die harmonische Reihe, bei der man die Terme $\frac{1}{1}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ und so weiter addiert. Die Glieder der Folge werden zwar immer kleiner, trotzdem ist die Reihe selbst divergent.

Das heißt, die Summe strebt keinem festen Wert zu, sondern wird im Grenzfall von unendlich vielen Termen selbst unendlich. Die Divergenz erfolgt jedoch sehr langsam. Addiert man etwa die ersten 100 Glieder der Folge, erhält man zirka 5,19 – die ersten 1000 Terme ergeben zusammen ungefähr 7,49. Die Geschwindigkeit, mit der die Reihe anwächst, lässt sich mit dem natürlichen Logarithmus abschätzen, dem zweiten Ausdruck in der großen Klammer.

Denn auch dieser strebt sehr langsam gegen unendlich. Der natürliche Logarithmus von 100 liegt bei etwa 4,6. Zieht man ihn von den ersten 100 Termen der harmonischen Reihe ab, ergibt das ungefähr

0,5848. Rechnet man mit 1000 Gliedern und dem natürlichen Logarithmus von 1000, ist die Differenz zirka 0,5777. Bei 10000 Termen berechnet sich der Unterschied zu 0,57726 ... Je mehr Glieder man hinzuzieht, desto stärker nähert sich das Ergebnis der Euler-Mascheroni-Konstante an.

Euler berechnete in seiner Arbeit aus dem Jahr 1734 5 Nachkommastellen dieser Konstante; im Jahr darauf erweiterte er sie auf 15. Nach seinem Tod setzte der italienische Mathematiker Lorenzo Mascheroni das Rechenwerk fort. 1790 publizierte er 19 korrekte Nachkommastellen. Mittlerweile kennt man mehr als 477 Milliarden Stellen, sie beginnen mit 0,57721566490153286060... Trotz der enormen Menge an Ziffern sind aber viele Eigenschaften dieser Zahl weiterhin unbekannt.

Zum Beispiel weiß man nicht, ob die Euler-Mascheroni-Konstante rational oder irrational ist. Lässt sie sich also als Bruch zweier ganzer Zahlen darstellen oder nicht? Bis heute ist es niemandem gelungen, entweder das eine oder das andere zu beweisen. Experten vermuten zwar, sie sei irrational, doch ein definitiver Nachweis steht noch aus.

Im Gegensatz zu prominenten irrationalen Zahlen wie der Kreiszahl π oder der Wurzel aus 2 trifft man die Euler-Mascheroni-Konstante nirgendwo in simplen und anschaulichen geometrischen Fragestellungen. Dafür aber in diversen anderen Disziplinen der Mathematik, etwa der Analysis oder der Funktionentheorie. Daher spielt ihre Zugehörigkeit eine wichtige Rolle. Und selbst wenn man von ihrer Anwendung absieht, ist es unbefriedigend, nicht zu wissen, mit was für einer Konstanten man es zu tun hat. Denn Zahlen sind das Fundament der Mathematik – da kann man sich keine Wissenslücken erlauben.



Computerprogramme unterstützen immer häufiger Ärzte bei ihrer Arbeit.

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ DIE ZUKUNFT DER RADIOLOGIE

Radiologen verwenden immer häufiger Deep-Learning-Algorithmen, um Krankheiten in medizinischen Scans von Patienten zu identifizieren. Doch wer ist verantwortlich, wenn den Programmen ein Fehler unterläuft?



Sara Reardon ist Journalistin und Molekularbiologin in Bozeman, Montana.

► [spektrum.de/artikel/1752446](https://www.spektrum.de/artikel/1752446)

Als Regina Barzilay mit Anfang 40 routinemäßig eine Mammografie durchführen ließ, zeigte das Bild weiße Flecken in ihrem Brustgewebe. Das kann auf eine Krebserkrankung hindeuten oder völlig harmlos sein – selbst den besten Radiologen fällt es oft schwer, den Unterschied zu erkennen. Barzilays Ärzte waren optimistisch und meinten, man müsse sich nicht sofort darum sorgen. »Ich hatte bereits Krebs, aber sie haben ihn nicht gesehen«, sagt Barzilay im Nachhinein.

In den folgenden zwei Jahren unterzog sie sich einer zweiten Mammografie, einem MRT und einer Biopsie, die allesamt weiterhin unklare oder gar widersprüchliche Befunde lieferten. Schließlich diagnostizierten die Mediziner 2014 Brustkrebs; allein schon der Weg dahin war unglaublich frustrierend für Barzilay. »Wie kann man drei Tests machen und dabei drei verschiedene Ergebnisse erhalten?«, fragte sie sich.

Inzwischen ist der Krebs geheilt. Doch Barzilay blieb weiterhin entsetzt darüber, dass sich die Behandlung vieler Patientinnen verzögert, weil man die Ergebnisse einer Mammografie nicht immer richtig deuten kann. Das wollte sie unbedingt ändern – und traf daher eine Entscheidung, die ihre Karriere und ihr Leben nachhaltig veränderte.

Als Informatikerin am Massachusetts Institute of Technology (MIT) hatte sich Barzilay nie mit Medizin beschäftigt. Vor ihrer Erkrankung untersuchte sie, wie man mit künstlicher Intelligenz natürliche Sprache verarbeiten kann. Nach ihrer Genesung suchte sie nach einem neuen Forschungsschwerpunkt und beschloss daher, gemeinsam mit Radiologen an Algorithmen zu arbeiten, die Krankheiten anhand von Mammografie-Scans identifizieren. Sie hoffte, die Programme könnten Muster erkennen, die dem menschlichen Auge entgehen.

In den folgenden vier Jahren trainierte ihr Team eine KI mit Mammografie-Aufnahmen von etwa 32.000 Frauen unterschiedlichen Alters und ethnischer Herkunft. Die Forscher teilten dem Programm zudem mit, welche der Patientinnen in den nächsten fünf Jahren nach der Aufnahme an Krebs erkrankt waren. Im Mai 2018 veröffentlichten Barzilay

und ihre Kollegen die Ergebnisse, wonach ihr Algorithmus das Risiko, an Krebs zu erkranken oder gesund zu bleiben, wesentlich genauer vorhersagte als bisher genutzte Verfahren. Barzilays Team testete zudem das Programm mit ihren eigenen Mammografien aus dem Jahr 2012. Diesem zufolge hätte sie ein höheres Risiko, in den nächsten fünf Jahren an Brustkrebs zu erkranken als 98 Prozent aller anderen Patientinnen.

Der Vorteil an selbstlernenden Algorithmen ist nicht nur, dass sie Details erkennen, die dem menschlichen Auge entgehen. Sie können darüber hinaus medizinische Bilder auf völlig neue Art interpretieren. Deshalb entwickeln momentan zahlreiche Forscher und Unternehmen derartige Algorithmen. Sie hoffen damit genauere Diagnosen zu treffen, um Patienten schneller und effizienter zu behandeln. Zudem könnte man die Programme in Entwicklungsländern und abgelegenen Regionen einsetzen, wo es an Radiologen mangelt. Darüber hinaus wäre es möglich, dass Wissenschaftler mit Hilfe selbstlernender Algorithmen bisher unbekannte biologische Mechanismen einer Krankheit aufdecken.

Künstliche Intelligenz in der Medizin: Freund oder Feind?

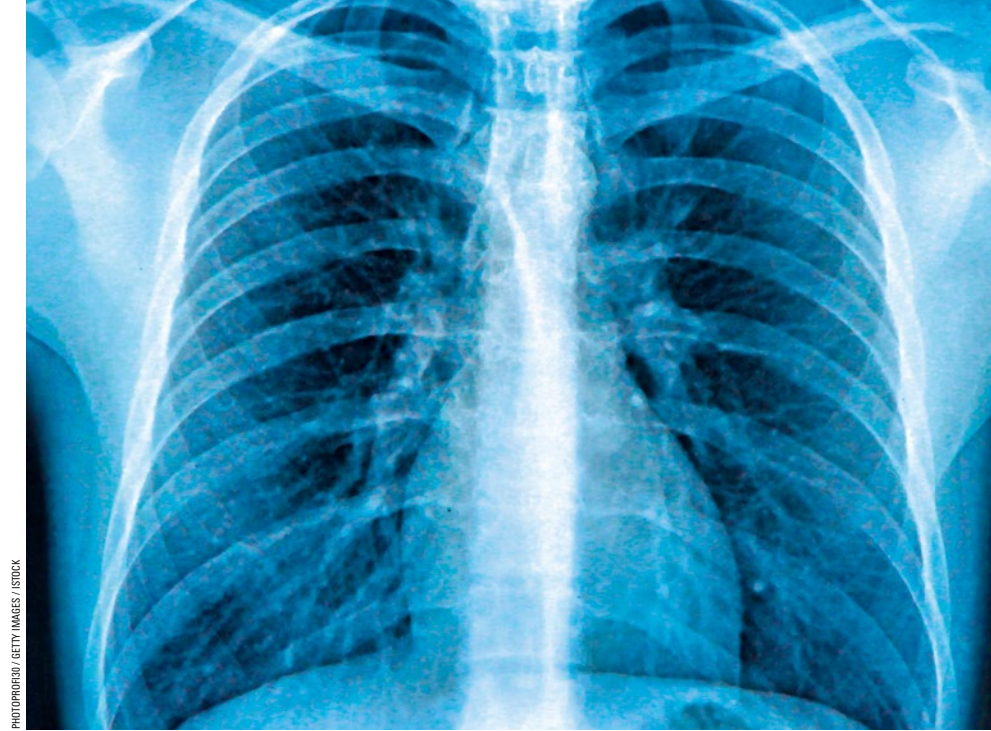
In den letzten Jahren kamen immer mehr KI-Anwendungen auf den Markt, die Mediziner unterstützen sollen. Einige Ärzte zeigten sich davon begeistert, denn die neuen Technologien könnten ihre Belastung reduzieren. Andere bangten dagegen um ihre Arbeitsplätze. Die Programme werfen außerdem noch nie dagewesene Fragen auf, etwa wie man einen sich ständig verändernden Algorithmus reguliert. Oder wer die Schuld trägt, wenn dieser eine falsche Diagnose stellt. Dennoch sind viele Ärzte optimistisch. »Wenn man die Modelle ausreichend überprüfen kann und wir ihre Funktionsweise besser verstehen, lässt sich das Niveau der Gesundheitsversorgung für alle erhöhen«, sagt der Radiologe Matthew Lungren von der Stanford University.

Die Idee, radiologische Scans mit Hilfe von Computern auszuwerten, ist nicht neu. Bereits in den 1990er Jahren verwendeten Radiologen ein Programm namens Computerassistierte Detektion (CAD), um Brustkrebs in Mammografien zu erkennen. Die Technologie wurde anfangs als revolutionär gefeiert, und die Kliniken übernahmen sie schnell. Doch sie erwies sich als zeitaufwändiger und schwieriger zu handhaben als die bestehenden Methoden. Einigen Studien zufolge machten Kliniken, die CAD einsetzen, mehr Fehler als solche, die es nicht nutzten. Der Misserfolg habe viele Ärzte an der computergestützten Diagnostik zweifeln lassen, so der Radiologe Vijay Rao von der Jefferson University in Philadelphia.

In den letzten zehn Jahren hat sich die künstliche Intelligenz stark weiterentwickelt, vor allem im Bereich der Computer Vision, zu dem unter anderem die Gesichtserkennung zählt. Die Programme werden allerdings auch immer besser darin, medizinische Scans auszuwerten. Die meisten Methoden basieren auf dem Prinzip des Deep Learning. Dabei erhält ein Computer eine Reihe von Beispielbildern, aus denen er ein Netzwerk aus Assoziationen entwickelt. Wenn man beispielsweise einem Programm sagt, welche

AUF EINEN BLICK KI MIT DURCHBLICK

- 1 Häufig ist es schwer, eindeutige Schlüsse aus radiologischen Aufnahmen zu ziehen. Deshalb werden einige Erkrankungen erst spät oder überhaupt nicht erkannt – was Menschenleben kostet.
- 2 Informatiker haben daher begonnen, Algorithmen zu entwickeln, die Radiologen bei ihrer Arbeit unterstützen sollen.
- 3 Allerdings ist es nicht leicht, Datensätze zu finden, die sowohl vielfältig sind, als auch genügend hochwertige Informationen enthalten, um die selbstlernenden Programme zu trainieren.



PHOTODISC/GETTY IMAGES/ISTOCK

»Was wir in der Medizin brauchen, sind mehr zwischenmenschliche Kontakte und Bindungen«

Eric Topol

Per Röntgenbild den Gesundheitszustand eines Patienten einzuschätzen, ist für Ärzte tägliche Arbeit. Ein Algorithmus kann dabei helfen, etwa ein hohes Risiko für einen Lungenkollaps schnell zu erkennen.

Bilder einer Krebserkrankung entsprechen, sucht es nach Merkmalen, die diesen Bildern gemein sind, aber in gesunden Beispielen nicht auftauchen.

Inzwischen haben sich die neuartigen Technologien in der Radiologie schnell verbreitet. »2018 war künstliche Intelligenz und die Bildgebung das Hauptthema jedes großen Meetings, zu dem ich ging«, sagt Rao, ehemaliger Präsident der Radiological Society of North America. Offiziell führt die US-amerikanische Food and Drug Administration (FDA) keine Liste der zugelassenen KI-Anwendungen, doch laut dem Forscher für digitale Medizin Eric Topol vom Scripps Research Institute in La Jolla, Kalifornien, genehmigt die Behörde wohl mindestens einen Algorithmus für die medizinische Bildgebung pro Monat. Eine 2018 von der Marketing-Intelligence-Firma Reaction Data durchgeführte Umfrage ergab, dass 84 Prozent der US-amerikanischen Radiologie-Kliniken künstliche Intelligenz einsetzen oder planen, sie künftig zu nutzen. Der Bereich wächst besonders schnell in China an, wo es mehr als 100 Unternehmen gibt, die derartige Technologien für das Gesundheitswesen konzipieren.

Ein weiteres Beispiel ist das Start-up-Unternehmen Aidoc in Tel Aviv, das Algorithmen entwickelt, um CT-Scans auf Anomalien hin zu analysieren und die entsprechenden Patienten an die Spitze der Prioritätenliste eines Arztes zu setzen. Das Programm verfolgt zudem, wie oft Ärzte es verwenden und wie lange sie damit verbringen, die gelieferten Schlussfolgerungen zu hinterfragen. »Anfangs sind sie meist skeptisch, aber nach zwei Monaten gewöhnen sie sich daran«, sagt Elad Walach, CEO von Aidoc.

Die damit einhergehende Zeitersparnis kann entscheidend sein, um einen Patienten zu retten. In einer kürzlich erschienenen Studie fanden Forscher heraus, dass Radiolo-

gen etwa 60 Prozent der von ihnen angeordneten Scans bei kollabierten Lungen als hochprioritär kennzeichnen. Häufig müssen sie sich allerdings erst stundenlang mit harmlosen Fällen beschäftigen, bevor sie sich dringenden Situationen zuwenden können. »Jeder Arzt, mit dem ich spreche, hat eine Geschichte, bei der er einen Patienten wegen eines Lungenkollapses verloren hat«, sagt Karley Yoder, Vizepräsident und Geschäftsführer von AI bei GE Healthcare in Boston, einem der führenden Hersteller von medizinischen Bildgebungsgeräten. Im vergangenen September genehmigte die FDA mehrere KI-Anwendungen, die nun in GE-Scanner integriert werden und automatisch dringende Fälle kennzeichnen.

Schnelle Lerner

Da sie riesige Datenmengen verarbeiten können, sind Computer in der Lage, analytische Aufgaben auszuführen, die über die menschlichen Fähigkeiten hinausgehen. Google entwickelt beispielsweise selbstlernende Algorithmen, die zweidimensionale CT-Bilder der Lunge zu einer dreidimensionalen Darstellung des Organs zusammensetzen. Dadurch kann die Software die gesamte Struktur untersuchen. Radiologen müssen hingegen jede Aufnahme einzeln betrachten und versuchen, alles im Kopf zu einem dreidimensionalen Gebilde zu rekonstruieren. Ein weiterer Google-Algorithmus kann sogar das Risiko von Patienten für Herz-Kreislauf-Erkrankungen bestimmen, indem er einen Scan ihrer Netzhaut analysiert. Dabei achtet er auf winzige Veränderungen, die abhängig von Blutdruck, Cholesterinspiegel, Rauchen und Alter auftauchen können.

Künstliche Intelligenz kann zudem bisher unbekannte Verbindungen zwischen biologischen Merkmalen und Erkrankungen aufdecken. Forscher veröffentlichten 2019 einen Deep-Learning-Algorithmus, den sie mit mehr als 85 000 Röntgenbildern des Brustbereichs trainiert hatten. Die entscheidenden Teilnehmer hatten an zwei großen klinischen Studien teilgenommen, bei denen sie über zwölf Jahre lang begleitet wurden. Der Algorithmus bewertete das Sterberisiko jedes Patienten in dem Zeitraum. Die

Forscher fanden heraus, dass 53 Prozent der Menschen, welche die KI in eine Hochrisikokategorie einstufte, innerhalb der zwölf Jahre verstarben – im Gegensatz zu vier Prozent aus der Niedrigrisikokategorie. Das Programm verfügte dabei über keinerlei näheren Informationen zu den Todesfällen, etwa zur Todesursache.

Um zu verstehen, wie der Algorithmus seine Einteilung traf, identifizierten die Forscher die Bildbereiche, die er für seine Berechnungen verwendete. Wenig überraschend befand sich darunter unter anderem der Taillenumfang und die Bruststruktur von Frauen, die bekanntlich Risikofaktoren für bestimmte Krankheiten darstellen. Aber der Algorithmus untersuchte auch die Region unter den Schulterblättern der Patienten, der Mediziner bisher keine Aufmerksamkeit geschenkt hatten. Lu vermutet, dass dieser Bereich mit der Beweglichkeit zusammenhängt: Bei einer Thoraxaufnahme müssen die Patienten das Gerät oft umarmen, und weniger gesunde Menschen, denen das nicht gelingt, könnten ihre Schultern anders positionieren. »Das ist nichts, worauf ich auf Anhieb geachtet hätte«, gibt Lu zu.

Die Funktionsweise einer KI wird oft als Blackbox bezeichnet: Es wirkt so, als ob sie in einem völlig dunklen Raum arbeitet, der für Menschen unzugänglich ist. Experten sind sich nicht einig, ob das in der medizinischen Bildgebung problematisch ist. Einige meinen, man müsse nicht zwingend wissen, wie ein Algorithmus funktioniert, solange er die Leistung der Ärzte und die Gesundheit der Patienten verbessert. Schließlich verstehen Forscher die Mechanismen vieler Medikamente noch immer nicht vollständig. Ein Beispiel dafür ist Lithium, das seit den 1950er Jahren bei Psychosen eingesetzt wird.

Dennoch lässt sich nicht leugnen, dass das Blackbox-Prinzip zu Missverständnissen führen kann. So waren Forscher an der Icahn School of Medicine at Mount Sinai in New York äußerst irritiert, als ein von ihnen entwickelter Deep-Learning-Algorithmus völlig andere Ergebnisse lieferte als menschliche Mediziner. Sie hatten ihr Programm mit Röntgenbildern vom Mount Sinai Hospital darauf trainiert, eine Lungenentzündung zu erkennen. Dabei erreichte es eine Genauigkeit von mehr als 90 Prozent. Doch bei Röntgenbildern aus anderen Kliniken schnitt es weitaus schlechter ab. Die Forscher fanden schließlich heraus, dass der Algorithmus nicht nur die Bilder analysierte, sondern auch berücksichtigte, wie häufig Lungenentzündungen in den jeweiligen Einrichtungen auftreten. Das hatten die Entwickler weder erwartet noch gewünscht.

Auf die Herkunft und Qualität der Datensätze kommt es an

Unvorhergesehene Faktoren wie diese beunruhigen Samuel Finlayson, der an der Harvard Medical School untersucht, wie man maschinelles Lernen im biomedizinischen Bereich anwenden kann. Er gibt zu bedenken, dass die Datensätze, mit denen man eine KI trainiert, auf unerwartete Weise verzerrt sein könnten. Zum Beispiel zeigt ein Bild, das man in einer Notaufnahme oder mitten in der Nacht aufgenommen hat, mit höherer Wahrscheinlichkeit eine kranke Person als eines, das während einer Routineuntersuchung gemacht wurde. Computerprogramme neigen dazu, über-

empfindlich auf solche Eigenschaften zu reagieren. Ein Algorithmus könnte demnach schließen, dass routinemäßig aufgenommene Bilder nie eine ernsthafte Erkrankung zeigen. Eine KI könnte aber genauso falsch auf Narben oder medizinische Implantate reagieren, die auf ein früheres Gesundheitsproblem eines Patienten hinweisen, und annehmen, Menschen ohne solche Merkmale seien nicht erkrankt. Selbst die Art und Weise, wie Bilder beschriftet sind, können ein Programm verwirren.

Die Lösung, so Finlayson, besteht darin, einen Algorithmus mit zahlreichen Daten aus verschiedenen Orten mit unterschiedlichen Patientenpopulationen zu trainieren. Anschließend müsse man ihn an einer neuen Gruppe testen. Nur sehr wenige Algorithmen wurden bisher auf

»Ich hatte bereits Krebs, aber sie haben ihn nicht gesehen«

Regina Barzilay

diese Weise entwickelt. Topol hat kürzlich dutzende verschiedene Studien genauer untersucht, bei denen die vorgestellten Algorithmen besser als Radiologen abschnitten. Dabei stellte er fest, dass die Wissenschaftler bloß bei einer Hand voll Arbeiten das Programm an Patienten geprüft hatten, die nicht zu den Beispieldaten zählten. »Algorithmen sind extrem empfindlich«, sagt Cynthia Rudin, Informatikerin an der Duke University. »Wenn man versucht, sie über die Trainingsdaten hinaus anzuwenden, funktioniert das nicht immer.«

Barzilays Team hat vor Kurzem den Algorithmus an 10000 Scans des Karolinska-Instituts in Schweden getestet. Die KI funktionierte dort ebenso gut wie in Massachusetts. Nun arbeitet die Gruppe mit Krankenhäusern in Taiwan und Detroit zusammen, um das Programm an weiteren Patientenpopulationen zu erproben. Ein großes Problem stellt momentan die Bewertung des Brustkrebsrisikos bei afro-amerikanischen Frauen dar, so Barzilay. Das liege daran, dass die bisherigen Standards hauptsächlich mit Hilfe von Scans weißer Frauen entwickelt wurden.

Stellt ein Algorithmus eine falsche Diagnose, dann führt die Blackbox der KI zu weiteren Schwierigkeiten, vor allem aus rechtlicher Sicht: Man muss herausfinden, ob der behandelnde Arzt oder das Programm die Schuld trägt. Oftmals kann ein Mediziner nicht erklären, wie der Computer zu seinem Ergebnis kam. Zudem ist die genaue Funktionsweise eines Programms häufig ein streng gehütetes Geschäftsgeheimnis. Weil Mediziner erst seit kurzer Zeit künstliche Intelligenz einsetzen, ist ein solcher Fall noch nicht eingetreten. Dadurch ist noch unklar, wer juristisch gesehen die Verantwortung trägt und welche Art von Transparenz man fordern sollte.

Rudin zeigt sich frustriert von dem Blackbox-Problem. »Es gibt keinen Grund, warum man keinen Roboter bauen könnte, der sich selbst rechtfertigt«, erklärt sie. Die meisten medizinischen Algorithmen basieren allerdings auf Deep-Learning-Ansätzen, die für andere Arten der Bildanalyse

entwickelt wurden. Es ist wesentlich schwieriger, ein transparentes Programm von Grund auf neu zu entwickeln, als einen bestehenden Blackbox-Algorithmus für medizinische Daten umzufunktionieren. Deshalb vermutet Rudin, dass die meisten Forscher zunächst ein Programm zum Laufen bringen und erst hinterher versuchen zu verstehen, wie es zu den Ergebnissen kommt.

Rudin entwickelt transparente Algorithmen, die Mammografien auf Tumoren hin analysieren und Mediziner ständig darüber informieren, was sie tun. Allerdings fehlen verfügbaren Daten, um das Programm erfolgreich zu trainieren. Zugängliche Bilder sind in der Regel schlecht beschriftet oder wurden mit veralteten Geräten aufgenommen, die man heute nicht mehr verwendet, sagt Rudin.

Das Blackbox-Problem stellt auch eine Herausforderung für Überwachungsbehörden dar. Im Gegensatz zu einem Medikament, das immer auf gleiche Weise funktioniert, verbessern sich maschinelle Lernalgorithmen im Lauf der Zeit selbst. Weil sie durch so viele verschiedene Eingaben beeinflusst werden, können die Programme durch scheinbar harmlose Änderungen wie ein neues IT-System in einem Krankenhaus plötzlich versagen.

Im vergangenen April schlug die FDA daher eine Reihe von Richtlinien vor, um selbstlernende Algorithmen zu verwalten. Unter anderem sollten Hersteller kontrollieren, wie sich die Programme ändern, um sicherzustellen, dass sie weiterhin wie geplant funktionieren. Zudem sollten sie die FDA benachrichtigen, wenn sie Modifikationen feststellen, die eine Neubewertung erforderlich machen könnten. Darüber hinaus rät die FDA den Herstellern, ihre Arbeit zu protokollieren, etwa wie sie die potenziellen Änderungen handhaben. »Es gibt eben kein Patentrezept«, sagt Bakul Patel, Direktor für digitale Gesundheit bei der FDA.

Richtlinien der Überwachungsbehörden

Im Jahr 2018 genehmigte die FDA den ersten Algorithmus, der eine medizinische Entscheidung treffen kann, ohne dass sich ein Arzt das Bild ansehen muss. Das von IDx Technology in Coralville, Iowa, entwickelte Programm untersucht Netzhautbilder, um eine diabetische Retinopathie zu erkennen. Nach Angaben des Unternehmens ist es dabei zu 87 Prozent genau. Der Vorstandsvorsitzende von IDx Michael Abramoff sagt, dass die Firma die Verantwortung für medizinische Fehler übernimmt, da kein Arzt involviert ist.

Dennoch bezweifeln die meisten Experten, dass Computer in absehbarer Zeit Ärzte ersetzen werden. »Algorithmen meistern häufig eine einzelne, spezielle Sache«, sagt Walach. Die Humanbiologie sei extrem komplex, »daher braucht man Menschen, die mehr als nur eine Sache wirklich gut können«. Mit anderen Worten: Selbst wenn ein Algorithmus ein bestimmtes Problem genauer diagnostiziert, erzielt man dennoch bessere Ergebnisse, wenn man zusätzlich die Erfahrung eines Arztes sowie die individuelle Geschichte des Patienten miteinbezieht. Eine spezialisierte KI könnte Radiologen Arbeit abnehmen und ihnen mehr Zeit für den Umgang mit Patienten geben. »Was wir in der Medizin brauchen, sind mehr zwischenmenschliche Kontakte und Bindungen«, sagt Topol.

Viele Experten, darunter auch Rao, gehen davon aus, dass sich die Ausbildung und die tägliche Arbeit von Radiologen in den kommenden Jahren drastisch verändern werden. »Algorithmen werden sie nicht ersetzen. Aber Radiologen, die KI-Programme verwenden, werden ihre Kollegen ersetzen, die keine nutzen«, sagt der Radiologe Curtis Langlotz in Stanford.

Gerade in Entwicklungsländern kann künstliche Intelligenz Ärzte unterstützen. Dort haben Mediziner oftmals keinen Zugang zu modernen Scannern. Zudem fehlt es oft an ausgebildeten Radiologen, um die Aufnahmen zu interpretieren. Weil die Medizin immer spezialisierter wird und stark von der Bildanalyse abhängt, wächst die Kluft zwischen dem Versorgungsstandard in wohlhabenderen und ärmeren Gebieten, so Lungren. Ein Algorithmus kann eine kostengünstige Möglichkeit sein, diese Lücke zu schließen – dafür braucht man meist nur ein Smartphone.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



METAMORWORKS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Lungren und sein Team entwickeln derzeit ein Gerät, das es Ärzten ermöglichen soll, eine Röntgenaufnahme mit der Handykamera abzufotografieren – und nicht wie sonst üblich, aufwändige digitale Scans aufzunehmen – und anschließend einen Algorithmus auszuführen, der eine Krankheit wie Tuberkulose automatisch erkennt.

Zudem könnte künstliche Intelligenz die medizinischen Unterlagen eines Patienten im Voraus untersuchen, um festzustellen, ob dieser überhaupt einen Scan benötigt, sagt Rao. Viele medizinische Ökonomen glauben, dass die Bildgebung überstrapaziert wird – allein in den USA werden jährlich mehr als 80 Millionen CT-Scans durchgeführt. Obwohl die Fülle an Daten nützlich für Forscher ist, die damit ihre Algorithmen trainieren, sind solche Maßnahmen außerordentlich kostspielig und setzen Patienten teilweise verzichtbarer Strahlung aus.

Barzilays Meinung nach ist eine KI am nützlichsten, wenn man sie als Partner einsetzt, um bestehende Probleme zu überwinden, die Ärzte allein nicht lösen können. Damit könnte verhindert werden, dass Patienten unnötig lange auf eine Behandlung warten müssen, wie sie es einst erlebt hatte. ◀

QUELLEN

Lu, M.T. et al.: Deep learning to assess long-term mortality from chest radiographs. *Jama Network Open* 2, 2019

Topol, E.J.: High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine* 25, 2019

Yala, A. et al.: A deep learning mammography-based model for improved breast cancer risk prediction. *Radiology* 292, 2019

ÖKOLOGIE DEM MIKROPLASTIK AUF DER SPUR

Überall in unserer Umwelt finden sich kleinste Kunststoffteilchen. Während längst eine große Debatte darüber läuft, wie wir die Flut an Mikroplastik eindämmen können, ist noch nicht klar, wie die Partikel auf Organismen wirken.



Carolin Völker (links) und Johanna Kramm leiten die Forschungsgruppe PlastX am ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung in Frankfurt am Main.

» spektrum.de/artikel/1752448

SERIE

Kunststoffe heute und morgen

Teil 1: **September 2020**

Dem Mikroplastik auf der Spur
Carolin Völker und Johanna Kramm

Teil 2: **Oktober 2020**

Chemisches Recycling
Tamara Worzewski

Teil 3: **November 2020**

Interview: Sind Biokunststoffe sinnvoll?
Hans-Josef Endres und Frederik Wurm



**Grün fluoreszierende
Mikroplastikpartikel im
Verdauungstrakt des
Großen Wasserfloh
(*Daphnia magna*).**

»Es waren im Durchschnitt etwa 3500 Kunststoffpartikel pro Quadratkilometer. (...) Bei den meisten Stücken handelte es sich um harte, weiße, zylindrische Pellets mit einem Durchmesser von etwa 0,25 bis 0,5 Zentimetern und abgerundeten Enden. Chemische Verwitterung und Wellenbewegung könnten die Pelletform erzeugt haben. Viele Stücke waren spröde, was darauf hindeutet, dass die Weichmacher durch die Verwitterung entwichen sind. Einige hatten scharfe Kanten, was entweder auf einen kürzlich erfolgten Eintrag ins Meer oder auf Fragmente kürzlich zerbrochener größerer Plastikteile hindeutet. Einige wenige Partikel (sechs Prozent) waren grün, blau oder rot gefärbt, und es gab auch eine kleine Anzahl von durchsichtigen Kunststofffolien. Mehrere größere Stücke konnten als Verschlusskappen von Spritzen, Zigarrenspitzen, Schmuck und Knöpfe identifiziert werden. Aus der Vielzahl der identifizierbaren Objekte war ersichtlich, dass viele Arten von Kunststoffen vorhanden waren.«

So berichteten die Wissenschaftler Edward Carpenter und K. L. Smith von der Woods Hole Oceanographic Institution bereits 1972 über die Funde auf ihrer dreiwöchigen Forschungsreise in die westliche Sargassosee, auf der sie die Meeresoberfläche mit Hilfe von feinsten Netzen durchkämmten – eigentlich, um das Plankton zu untersuchen. Zusätzlich zu den winzigen Organismen stießen sie auf verschiedene Plastikfragmente, die sie in einem Artikel in der Fachzeitschrift »Science« beschrieben. Doch erst rund 30 Jahre später prägte der Meeresbiologe Richard Thompson den Begriff, mit dem wir heute winzige Plastikteile in der Umwelt bezeichnen: Mikroplastik.

Heute ist Mikroplastik keine zufällige Entdeckung mehr. Planktonnetze setzt man vielmehr gezielt ein, um Meeren und Ozeanen sowie Flüssen und Seen Plastikpartikel für Analysen zu entnehmen. Heute wie damals will man dadurch herausfinden, wie verbreitet sie sind und wo sie in der Umwelt vorkommen, welche Schadstoffe mit den Partikeln eingetragen werden und welche Folgen sich für das Ökosystem ergeben können. Und nicht zuletzt wollen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verstehen, woher die winzigen Bruchstücke stammen und wie sich ihr Eintrag in die Umwelt verhindern lässt. Obwohl die Auswirkungen von Mikroplastik gerade in den letzten 15 Jahren zunehmend untersucht wurden, sind viele Fragen nach wie

vor nicht vollständig beantwortet. Das liegt unter anderem daran, dass Forschung auf diesem Gebiet für die Wissenschaft eine besondere methodische Herausforderung darstellt.

So ist es bereits schwierig zu erfassen, welche Mengen tatsächlich in die Ökosysteme gelangen. Zunächst haben sich die Forscher auf Ozeane und Meere fokussiert, in denen sie die ersten zufälligen Funde gemacht hatten. Wegweisend war dazu die Arbeit des Meeresbiologen Richard Thompson von der University of Plymouth und seines Teams. Im Jahr 2005 fassten sie die zahlreichen kleinen Plastikfragmente in einer Publikation zum ersten Mal unter dem Begriff Mikroplastik zusammen. Bei der Untersuchung von Stränden und Sedimenten an der Küstenregion um Plymouth (Großbritannien) hatten sie Bruchstücke entdeckt, die sie neun unterschiedlichen Polymeren zuordnen konnten. Mit ihrer Veröffentlichung lenkten sie die Aufmerksamkeit von Wissenschaft und Öffentlichkeit von den großen, sichtbaren Abfallansammlungen in den Meeren vermehrt auf die verdeckte Kontamination mit fein zerriebenen Plastikpartikeln.

Die Funde überall auf der Welt spiegeln wider, was wir im Alltag verwenden

In den darauf folgenden Jahren erschienen viele weitere Studien, die mit unterschiedlichen Methoden nachwiesen, dass die kleinen Teilchen überall im Meer vorkommen – selbst an so abgelegenen Orten wie der Tiefsee oder der Arktis. »Hotspots« der Verunreinigung sind die fünf großen ozeanischen Wirbel, in denen sich auf Grund der Meeresströmungen schwimmende Kunststoffabfälle ansammeln. In Europa wies man Mikroplastikfragmente in der Ost- und Nordsee sowie im Mittelmeer nach. Aber nicht nur im Wasser, wo stärker kontaminierte Proben mehrere hundert Partikel pro Liter enthalten, sind sie vorhanden, sondern ebenso in Sedimenten von Küsten und Meeresböden. Dort finden sich meist bis zu 100 Partikel pro Kilogramm, an stärker verschmutzten Stellen wie etwa Häfen oder Flussmündungen sind es sogar mehrere hundert bis zu 1000. Und an Stränden schwimmen die Gezeiten die feinen Stückchen ebenfalls an, wo sie sich teilweise in sichtbar großen Mengen ansammeln, wie die Bilder des Strands von Famara auf Lanzarote eindrücklich zeigen (siehe Fotos rechts und auf S. 62).

Die Partikel bestehen vorwiegend aus Kunststoffen des alltäglichen Gebrauchs, die in großen Mengen produziert werden: Das sind beispielsweise gängige Verpackungsmaterialien wie Polyethylen (PE), Polyethylenterephthalat (PET) und Polypropylen (PP), das zur Produktion von Styropor oder Schaumstoffen benötigte Polystyrol (PS) sowie Polyvinylchlorid (PVC), aus dem sich Fußbodenbeläge oder Gartenstühle herstellen lassen. Häufig finden sich zudem Polyamidfasern (Nylon) darunter, die sich aus Fischernetzen lösen. Bis auf die Netze, die auf See verloren gehen, stammen die meisten anderen Plastikfragmente von Produkten, die auf dem Festland verwendet werden und ihren Weg ins Meer gefunden haben. Das geschieht zum einen über Flüsse, denen sich die Forschung zu Mikroplastik in den letzten Jahren verstärkt gewidmet hat. Auch hier wurden

AUF EINEN BLICK FEIN VERTEILT UND ÜBERALL

- 1** Weltweit finden sich in nahezu allen Ökosystemen feinste Plastikfragmente.
- 2** Welche Folgen Mikroplastik für die Umwelt hat, ist noch nicht sicher abzuschätzen.
- 3** Die winzigen Partikel machen nur einen kleinen Teil der Verunreinigung mit Kunststoffen aus.



CAROLIN VÖLKER

Die Gezeiten spülen zahlreiche Kunststoffteilchen an den Strand von Famara auf Lanzarote.

rund um den Globus unterschiedliche Mengen an Partikeln entdeckt. Besonders häufen sich die Funde etwa in der Nähe von Produktionsstätten: Hier können feine Kunststoffgranulate, die zur Herstellung von Plastikprodukten verwendet werden, verloren gehen und mit dem Abwasser in die Flüsse gelangen. Auf dem gleichen Weg erreichen außerdem winzige Plastikfragmente aus Haushalten die Gewässer. Das können etwa Fasern von Kleidung sein, die sich beim Waschen lösen, oder Mikroplastikpartikel aus Kosmetikprodukten. Doch genauso trägt Regenwasser, das von Flächen abläuft, kleine Kunststoffreste in die Gewässer ein, wie den Abrieb von Autoreifen und Splitter von Baustoffen oder Lacken – also Stadtstaub, der zu einem großen Anteil aus Mikroplastik besteht.

Durch die breite Verwendung von Kunststoffprodukten in unserem Alltag sind in der Luft über dicht besiedelten Regionen feine Plastikpartikel zu finden – was naheliegend ist. Niederschläge waschen sie aus und transportieren sie in Gewässer. Und Böden gelten ebenfalls als belastet: Mikroplastikteilchen vermutet man vor allem auf landwirtschaftlichen Flächen, auf denen beispielsweise Kunststofffolien zum Einsatz kommen oder auf denen Kompost oder Klärschlamm als Dünger dienen. Denn bei der Klärung von Abwasser, das mit Mikroplastik belastet ist, verbleiben über 95 Prozent der Partikel im Schlamm. Werden Felder mit solchem Schlamm gedüngt, gelangen auch die Partikel auf die landwirtschaftlichen Flächen.

Genauere Zahlen dazu, wie stark Wasser, Boden und Luft belastet sind, existieren bisher nicht. Die Werte beruhen auf Einzelmessungen oder Schätzungen und unterscheiden sich von Region zu Region stark. In deutschen Flüssen beträgt der höchste gemessene Wert umgerechnet 0,2 Partikel pro Liter Flusswasser, während Proben aus dem Ozean im selben Volumen mehrere hundert Teilchen enthalten können. Die Plastikfragmente stammen je nach Gebiet aus unterschiedlichen Quellen: Im Ozean machen sekundäre Partikel, also solche, die aus dem Zerfall größeren Plastikmülls entstehen, den höchsten Anteil aus. In deutschen Gewässern hingegen lässt sich die Belastung vor allem auf den Abrieb von Reifen sowie den Verschleiß von Baumaterialien zurückführen. Plastikpartikel, die aus Kosmetikprodukten über den Abwasserpfad die Umwelt erreichen, tragen nur einen sehr geringen Teil dazu bei.

Schwierige Spurensuche

Mikroplastik in der Umwelt nachzuweisen, ist aus vielerlei Gründen aufwändig und schwierig. Denn zum einen sind die Partikel vielfältig und können sich je nach ihren chemischen Eigenschaften in unterschiedlichen Umweltkompartimenten – also Luft, Böden oder Gewässern – sammeln. Zum anderen fehlen bislang einheitliche analytische Methoden. Somit unterscheiden sich Messergebnisse teilweise erheblich voneinander, je nachdem, mit welchen Verfahren die mikroskopisch kleinen Stückchen gesammelt und analysiert wurden. Partikel im Ozean filtert man zumeist mit Planktonnetzen aus dem Wasser, wobei sich im Netz anschließend gemeinsam mit ihnen viele andere Schwebstoffe (etwa natürliche Partikel oder Plankton) befinden, von

denen die Plastikteilchen getrennt werden müssen. Das gleiche Problem ergibt sich, wenn man eine Sediment- oder eine Bodenprobe analysiert – weil eine solche zu einem Großteil aus Sand und organischen Substanzen besteht, die nur schwer von den zu untersuchenden Teilchen zu separieren sind.

Die analytischen Methoden zur Identifikation von Mikroplastikpartikeln werden ständig weiterentwickelt, denn nur wenn belastbare Zahlen zu Umweltkonzentrationen vorliegen, lässt sich bewerten, welches Risiko Schadstoffe für Ökosysteme darstellen. Bloß weil ein Stoff vorhanden ist, bedeutet das noch nicht, dass er schädlich ist – um das beurteilen zu können, muss bekannt sein, welchen Mengen ein Organismus in der Umwelt ausgesetzt ist. Schon die frühen Studien aus den 1970er Jahren wiesen darauf hin, dass Fische Plastikpartikel verschlucken, da man sie im Darm der Tiere gefunden hatte. Mittlerweile hat man die feinen Polymerstückchen außerdem im Verdauungstrakt

Plastikfragmente in der Umwelt bestehen aus Bruchstücken größeren Abfalls oder aus kleinen Kügelchen, die für die Herstellung von Kunststoffprodukten benutzt werden.

vieler weiterer Organismen nachgewiesen, darunter in zahlreichen unterschiedlichen Fischarten und Muscheln. Schädliche Effekte auf die Tiere – wie es oft bei größeren Plastikteilen, an denen Wildtiere verenden können, der Fall ist – zeigten sich im Fall von Mikroplastik jedoch nicht direkt.

Um die Auswirkungen der Partikel genauer zu verstehen, setzt man Wasserorganismen in Laborstudien Mikroplastikpartikeln aus und untersucht die Folgen. Wie sich hierbei beobachten ließ, nehmen Kleinstlebewesen in den Gewässern, also kleine Schnecken, Wasserflöhe und andere planktonische Organismen, die Teilchen ebenfalls auf (siehe Bild auf S. 59). Die meisten der Tierchen scheiden sie laut den Studien aber problemlos wieder über den Verdauungstrakt aus.

In manchen Fällen haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler jedoch schädliche Effekte nach der Aufnahme von Mikroplastik nachgewiesen. So zeigten sich bei Miesmuscheln Entzündungsreaktionen in den Zellen, während Wasserflöhe langsamer wuchsen und sich weniger fortpflanzten. Es gibt unterschiedliche Theorien über die genauen Wirkungsmechanismen auf die Lebewesen, die allerdings noch nicht bewiesen sind. Zum einen können Substanzen wie Weichmacher aus den Partikeln austreten



Was ist Mikroplastik?

Als Mikroplastik bezeichnet man generell alle Kunststofffragmente, die kleiner sind als fünf Millimeter. Sie entstehen, wenn größerer Plastikmüll verwittert und dadurch in immer kleinere Teile zerfällt oder zerrieben wird.

Die winzigen Bruchstücke erreichen aber ebenso über andere Wege die Umwelt: So verwendet man für die Herstellung von Kunststoffprodukten beispielsweise feine Granulate, die an den Produktionsstätten in Böden, Luft oder Gewässer gelangen können. Darüber hinaus enthalten bestimmte Körperpflege- und Reinigungsmittel kleine Mikroplastikkügelchen, die für einen Schleifeffekt sorgen. Nach der Nutzung solcher Produkte finden sie über das Abwasser den Weg in die Ökosysteme.

Kunststoffteilchen, die durch Verwitterung entstehen, fasst man als »sekundäres Mikroplastik« zusammen, während die direkt für bestimmte Anwendungen produzierten Pellets und Granulate als »primäres Mikroplastik« bezeichnet werden.

Nicht nur ihre Herkunft, auch die Partikel selbst sind höchst uneinheitlich. Sie bestehen aus verschiedenen Polymerarten, haben unterschiedliche Größen und Farben, und ihre Form reicht von Kügelchen über scharfkantige Fragmente bis hin zu feinen Fasern. Die Vielfalt der Plastikpartikel, die in der Umwelt auftreten, spiegelt somit gewissermaßen das breite Spektrum an Kunststoffprodukten und deren Verwendungsarten in unserem Alltag wider.

Mikroorganismen besiedeln die kleinen Teilchen in der Umwelt recht schnell und bilden auf ihnen einen so genannten Biofilm. Neben der generellen Verwitterung tragen die Mikroben dazu bei, dass sich die Fragmente nach und nach immer weiter zersetzen. Das Ergebnis sind winzige, oft als Nanoplastik bezeichnete Partikel. Theoretisch können Tiere sie ebenfalls aufnehmen, wobei über die möglichen Effekte noch wenig bekannt ist. Mit der Zeit werden selbst die kleinsten Plastikteilchen in der Umwelt vollständig in einzelne Moleküle zersetzt oder mineralisiert, das heißt in Kohlenstoffdioxid und Wasser zersetzt. Wie lange dieser Prozess dauert, hängt stark von der jeweiligen Plastiksorte und dem Ablagerungsort ab.

und Organismen schädigen, zum anderen kann schon allein die Form der mikroskopisch kleinen Stücke Verletzungen im Verdauungstrakt auslösen. Besonders winzige Partikel mit einer Größe von nur einigen Nanometern stehen im Verdacht, aus dem Verdauungstrakt in die Zellen aufgenommen zu werden und dort toxisch zu wirken. Genauso kommen indirekte Effekte nach der Aufnahme in den Verdauungstrakt in Frage: etwa, dass die Tiere auf Grund eines verstopften Darms weniger Nahrung zu sich nehmen und dadurch schlechter wachsen. Darüber hinaus lagern sich organische Schadstoffe an Mikroplastikpartikel in der Umwelt an, können gemeinsam mit ihnen in die Tiere gelangen und sie dadurch schädigen. Die möglichen Effekte sind also so divers wie die Teilchen selbst. Bei der Untersuchung biologischer Folgen muss man daher verschiedene Plastikarten sowie unterschiedliche Formen und Größen der Partikel berücksichtigen, da all diese Faktoren Folgen für die Organismen haben können.

Mehr als 100 verschiedene Substanzen in einem Partikel

Laut aktuellen Studien enthalten Mikroplastikpartikel, je nachdem, aus welchem Produkt sie stammen, unterschiedliche Mischungen von Chemikalien. Ein einziger kann teilweise über hundert verschiedene Substanzen beherbergen. Treten die Stoffe aus den winzigen Fragmenten aus, schädigen sie Wasserflöhe, was sich im Laborversuch unter anderem durch eine geringere Vermehrung äußert. Man kann jedoch nicht annehmen, alle Mikroplastikstückchen wirkten nach einem solchen Mechanismus. Für

Partikel anderer chemischer Herkunft ließ sich kein Effekt der Chemikalienmischung nachweisen, und dennoch schädigten die Teilchen den Versuchsorganismen leicht. Es müssen demnach darüber hinaus andere, partikelspezifische Faktoren wie Größe, Form oder Oberflächenbeschaffenheit eine Rolle bei der giftigen Wirkung spielen, wenngleich in geringerem Ausmaß.

Da die Mikroplastikstückchen so vielfältig sind, ist lediglich ein Bruchteil von ihnen untersucht, und es lassen sich nur unsichere Vorhersagen über die Folgen für die Umwelt treffen. Die bisher durchgeführten Labortests sagen für sich genommen nämlich wenig über die tatsächlichen Konsequenzen für die Ökosysteme aus, sondern müssen ins Verhältnis zu den Mengen gesetzt werden, in denen Mikroplastik dort vorkommt. So hat man im Labor bis heute fast alle Effekte erst bei sehr hohen Konzentrationen nachgewiesen (bis zu Millionen Partikeln pro Liter), in der Umwelt finden sich allerdings viel geringere Mengen (einige hundert Teilchen pro Liter – das heißt, 10000-mal weniger). Darüber hinaus wurde in den meisten Studien nicht getestet, wie natürlich vorkommende Partikel (beispielsweise Sand) in hohen Konzentrationen auf die Tiere wirken. Es ist also nicht zu erwarten, dass Mikroplastikpartikel akut giftig für Lebewesen sind.

Trotzdem sollen die Ergebnisse keine Entwarnung für die Kontamination mit Kunststoffabfällen geben. Denn die mikroskopischen Verunreinigungen sammeln sich auf Grund ihrer langen Abbauezeiten in der Umwelt immer weiter an, wodurch ihre Konzentrationen dort ständig steigen. Darauf wiesen bereits die Autorinnen und Autoren

Aufbau und Inhaltsstoffe von Plastik

Kunststoffe sind weder ein einheitliches Material noch bestehen sie aus einer einzigen Substanz. Gemeinsam ist ihnen, dass sie hauptsächlich Makromoleküle enthalten. Das sind Polymere, die aus sich wiederholenden Grundeinheiten (Monomeren) aufgebaut sind. So besteht der Kunststoff Polyethylen (PE) aus tausenden aneinandergereihten Ethyleneinheiten. Das Polymer an sich macht allerdings noch nicht den fertigen Kunststoff aus. Diesem setzt man während der Produktion noch einige Stoffe zu, die so genannten Additive.

Solche Zusatzstoffe verbessern den Produktionsprozess sowie die Erscheinung und die Eigenschaften des Endprodukts. Abhängig davon,

wo sie zum Einsatz kommen – sei es als Gehäuse eines Laptops, als Fasern für Kleidung oder als Verpackung für Lebensmittel –, müssen die Kunststoffe spezifische Anforderungen erfüllen, etwa beständig gegen Hitze oder Feuchtigkeit, hart oder flexibel sein. Je nach erwünschter Funktion fügt man dem Polymer eine Kombination an Zusatzstoffen bei. Bekannte Additive sind Weichmacher wie Phthalate, Flammschutzmittel wie polybromierte Diphenylether, Antioxidanzien wie Bisphenol A (BPA) und Butylhydroxytoluol (BHT), Farbstoffe wie Nonylphenol und antimikrobielle Wirkstoffe wie Triclosan.

Neben diesen gezielt zugesetzten Verbindungen gelangen

während der Herstellung und Verarbeitung weitere Substanzen in den Kunststoff. Dazu gehören Chemikalien, die für die Produktion notwendig sind (beispielsweise Katalysatoren und Lösemittel), sowie Reaktions- und Abbauprodukte, die bei der Herstellung entstehen. Die meisten im Plastik enthaltenen chemischen Substanzen sind nicht fest mit dem Polymer-Grundgerüst verknüpft. Somit können sie mit der Zeit austreten. Gelangen Kunststoffabfälle in die Umwelt, können die dort herrschenden Bedingungen wie Sonneneinstrahlung und Wasserströmungen die Freisetzung und Verteilung der Substanzen noch weiter begünstigen.

in den Studien der 1970er Jahre hin. Darüber hinaus nimmt die Produktion von Plastikprodukten weltweit stetig zu – und in der Folge die Abfallmengen sowie deren Einträge in die Ökosysteme. Mittlerweile ist über die weit reichende Verunreinigung mit kleinsten Plastikfragmenten auch außerhalb der Wissenschaft eine Diskussion entbrannt, die sich vor allem um die möglichen Auswirkungen von Mikroplastik auf die menschliche Gesundheit dreht sowie um die Frage, wie sich dessen Eintrag in die Umwelt vermeiden lässt.

Bis das Thema gesellschaftlich relevant wurde, dauert es von den ersten Funden in den 1970er Jahren allerdings Jahrzehnte. Hierfür war besonders von Bedeutung, dass die Teilchen nicht nur in Meeren, sondern auch in Seen und Flüssen auftauchten und somit immer näher an den Menschen heranrückten. So detektierten Marcus Eriksen vom 5 Gyres Institute und sein Team im Jahr 2013 Mikroplastik in den Großen Seen Nordamerikas, und genauso entdeckten Wissenschaftler Plastikfragmente in Binnengewässern Deutschlands und Italiens. Die Studien fanden in den Medien großen Anklang und lösten Fragen nach der Herkunft der Partikel aus sowie dazu, welche Auswirkungen die Funde auf das Trinkwasser oder Speisefische und damit auf den Menschen haben könnten.

Eriksen und sein Team identifizierten ihre Beute aus den Großen Seen hauptsächlich als so genannte »microbeads«, also als Mikroplastikpartikel, die in Kosmetik- und anderen Pflegeprodukten enthalten sind. Zur Erklärung, woher die Partikel in den Gewässern stammten, verwies man häufig auf Kläranlagen. Diese würden die winzigen Stücke nicht ausreichend zurückhalten und über das Abwasser freisetzen. Mit dieser Argumentation wurde eine klare Ursache-

Wirkungs-Kette kommuniziert: »Mikroplastik in der Umwelt stammt aus Kosmetikprodukten und wird über das Abwasser eingetragen.« Dadurch war es einfach, die Verantwortlichen auszumachen. In den USA konfrontierten daraufhin Gruppen aus Wissenschaft und Umweltschutz große Unternehmen der Kosmetikbranche mit den Ergebnissen. Obwohl die Firmen freiwillig versprachen, ihren Produkten künftig keine »microbeads« mehr zuzusetzen, erließen einzelne US-amerikanische Staaten Verwendungsverbote. Um einen Flickenteppich an Verboten zu vermeiden, verabschiedete der damalige US-Präsident Barack Obama im Dezember 2015, zwei Jahre nach den ersten Studien über Mikroplastik in den Großen Seen, ein Gesetz, das »microbeads« in abwaschbarer Kosmetik verbietet (Microbead-Free Waters Act of 2015).

Mikroplastik gelangt in unsere Nahrung – aber anders als gedacht

Die Datenlage erschien zum damaligen Zeitpunkt eindeutig, und die vermeintlichen Verursacher waren gefunden. Mit zunehmender Forschung wurde jedoch klar, dass die Kausalitäten komplizierter sind. Denn »microbeads« aus Kosmetik stellen nur einen verschwindend geringen Teil der Mikroplastikpartikel in der Umwelt dar, und Kläranlagen leisten einen großen Anteil daran, deren Eintrag in die Gewässer zu verhindern, da sie 95 bis 99 Prozent von ihnen im Klärschlamm zurückhalten. Somit haben wir es statt mit eindeutigen Zusammenhängen vielmehr mit einer komplexen Problematik zu tun: Es gibt zahlreiche Quellen (Fragmente aus sich zersetzendem größerem Plastikmüll, Reifenabrieb, Textilfasern, Baustoffe, Kosmetik – all jenen Kunststoffprodukten, die wir in unserem Alltag verwenden),

mehrere Eintragspfade (wie beispielsweise Abwasser, unsachgemäße Abfallentsorgung, ungesicherte Deponien, Pelletverluste bei der Produktion) und damit verschiedene Eigenschaften der Partikel mit potenziell unterschiedlichen biologischen Effekten.

Die Maßnahmen, die den Eintrag von »microbeads« in die Umwelt verhindern sollen, stellen dennoch einen ersten richtigen Schritt dar. In Europa steht ein Verbot der zugesetzten Plastikteilchen in Kosmetik noch aus. Derzeit erarbeitet die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) einen Vorschlag, die Verwendung von Mikroplastik, das einem Produkt absichtlich hinzugefügt wurde, einzuschränken. Davon wäre eine Reihe von Waren betroffen, wie bestimmte Arten von Kosmetika, Düngemittel, Pflanzenschutzmittel, Reinigungsmittel für Haushalt und Industrie sowie Farben und Erzeugnisse für die Öl- und Gasindustrie. Die Partikel fungieren in diesen Produkten beispielsweise als Schleifmittel oder kontrollieren die Dicke, das Aussehen und die Stabilität. Doch gleichzeitig gilt es Maßnahmen zu entwickeln, um zu vermeiden, dass sekundäres Mikroplastik entsteht. In der Europäischen Union gibt es zwar mittlerweile eine Richtlinie für Einwegplastik, dennoch braucht es noch weitere Ansätze, dessen Verwendung sowie die verschiedenen Eintragswege von Plastikmüll einzudämmen.

Inzwischen ist das Thema in Deutschland einem breiten Teil der Bevölkerung bekannt. Wie die regelmäßige Konsumentenbefragung des Bundesinstituts für Risikobewertung zeigt, haben seit 2015, als die Kategorie »Mikroplastik in Lebensmitteln« mit in die Umfrage aufgenommen wurde, immer mehr Menschen davon gehört (2015 waren es 58 Prozent, 2019 schon 89 Prozent). Gleichzeitig zeigten sich 2019 bereits 63 Prozent der Befragten besorgt darüber, während es 2016 (dem Jahr, in dem »Besorgnis« zum ersten Mal abgefragt wurde) noch 52 Prozent waren. Die Befürchtung, Mikroplastik mit der Nahrung aufzunehmen, ist vor allem auf die Funde in Fischen zurückzuführen, aber auch auf erste Nachweise in Bier und Honig, über die Medien viel berichteten. Die Ergebnisse legten nahe, dass alle Nahrungsmittel weit reichend mit den kleinen Teilchen belastet sind. Wieder schien die Faktenlage zunächst klar. Doch wie sich später herausstellte, waren die Partikel über Verunreinigungen im Labor in die Proben gelangt. Im Fall belasteter Trinkwasserproben von überall auf der Welt ließ sich später ebenfalls nicht ausschließen, dass die beteiligten Labore ihre Proben unsauber genommen hatten. Die hier beschriebenen Probleme bestätigen, wie schwierig es ist, zu wissenschaftlich verlässlichen Aussagen zu kommen, und wie wichtig eine standardisierte Probenahme und Analytik ist.

Wir nehmen dennoch Mikroplastik über die Nahrung auf, aber über einen anderen Pfad: Nach Ergebnissen von Studien, die Plastikfragmente in Fischproben aus dem Supermarkt feststellen konnten, haben die Tiere die Partikel nicht im Meer zu sich genommen. Vielmehr sind diese über die Staubpartikel in der Luft im Verkaufsgeschäft auf die Fische gelangt. Die gängige Erklärung, Mikroplastik aus dem Meer reichere sich in der Nahrungskette an und gelangt über Meeresfrüchte und Fisch auf unsere Teller, ist bisher nur in Einzelfällen nachgewiesen. Viel relevanter

scheint die Aufnahme von Plastikpartikeln und -inhaltsstoffen durch den alltäglichen Umgang mit Plastikprodukten, der oft ganz unbewusst erfolgt. Kunststoffverpackte Waren und Lebensmittel, Textilien aus Kunstfasern, Haushalts- und Elektrogeräte, Möbel, Spielzeug und viele weitere Gegenstände tragen also zum einen zur umfassenden Kontamination der Umwelt mit feinsten Plastikbruchstücken bei, zum anderen nehmen wir Menschen Mikroplastik über sie direkt auf. Die Mengen, die wir einatmen oder verschlucken, sind allerdings gering und gefährden die Gesundheit nicht akut. Anders verhält es sich mit den Plastikadditiven, die sich aus den Produkten lösen und dadurch etwa von der Verpackung in Lebensmittel übertreten können. So lassen sich zugesetzte Chemikalien, die im Verdacht stehen, auf das Hormonsystem zu wirken und in den Stoffwechsel einzugreifen, in Blut und Urin einer breiten Bevölkerungsgruppe nachweisen.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



NASA / JPL / SUW-GRAFIK

Das Problem besteht also nicht nur in Form von Mikroplastikpartikeln an sich, sondern darüber hinaus vor allem in den zahlreichen chemischen Substanzen, die für die Herstellung von Kunststoffen eingesetzt werden. Die winzigen Plastikfragmente sammeln sich zwar mit der Zeit in immer größeren Mengen an und setzen unsere ohnehin bereits stark belasteten Ökosysteme dadurch zusätzlich unter Druck. Verglichen damit schädigen die in Plastik enthaltenen Chemikalien, wenngleich sie weniger sichtbar sind, die Umwelt jedoch deutlich stärker. Um mit der komplexen Situation umzugehen, genügt es nicht, den Abfalleintrag in die Umwelt zu verringern. Gleichzeitig müssen wir die Herstellung von Kunststoffen, gerade in Bezug auf die verwendeten Inhaltsstoffe, und deren massenhafte Nutzung in vielen Bereichen grundsätzlich anders gestalten. ◀

QUELLEN

Carpenter, E.J., Smith, K.L.: Plastics on the Sargasso Sea surface. *Science* 175, 1972

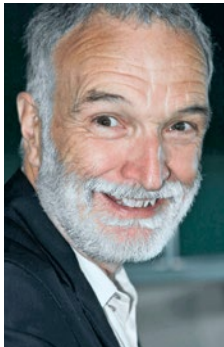
Eriksen, M. et al.: Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 77, 2013

Kramm, J., Völker, C.: Understand the risks of microplastics: A social-ecological risk perspective. In: Wagner, M., Lambert, S. (Hg.): *Freshwater Microplastics*. Springer, 2018, S. 223–237

Thompson, R.C. et al.: Lost at sea: Where is all the plastic? *Science* 304, 2004

Zimmermann, L. et al.: Benchmarking the in vitro toxicity and chemical composition of plastic consumer products. *Environmental Science & Technology* 53, 2019

SCHLICHTING! CAPPUCCINO MIT DÄMPFER



Schaum hat einige typische Eigenschaften eines Festkörpers. Darum wirkt er auf der Oberfläche einer Flüssigkeit fast wie ein Deckel – und kann bei starken Bewegungen sogar ihr Überschwappen verhindern.

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/1752458

das schäumte hoch; dick & gelbbraun

Arno Schmidt (1914–1979)

Der Coffee to go ist seit vielen Jahren beliebt, aber beim Transport des vollen Bechers gibt es oft Probleme. Der Rhythmus des Gehens mit einem am starren Arm gehaltenen Getränk regt Wellen auf dessen Oberfläche an. Dann schwappt es schon nach wenigen Schritten über (»Spektrum« April 2014, S. 56). Das Phänomen betrifft normalen Kaffee mit und ohne Milch, doch Cappuccino bleibt weitgehend von solchen Verlusten verschont. Der Unterschied zwischen den Getränken liegt an der Art, wie die Milch zugegeben wird: in dem einen Fall flüssig und im anderen aufgeschäumt – gewissermaßen als Deckschicht. Letztere scheint dämpfende Eigenschaften zu haben. Die Ursache dafür steckt in der Struktur von Schäumen.

Im Alltag haben wir vorwiegend Erfahrungen mit Seifenschaum gesammelt. Jedes Kind weiß, wie daraus ein regelrechter Turm entsteht: Man pustet mit einem Strohhalm in ein Glas mit Seifenlauge, bis schließlich ein Zusammenschluss zahlreicher Blasen oben herausquillt.

Blasen sind mit einem Gas sozusagen aufgepumpte, im Idealfall kugelförmige Flüssigkeitslamellen (»Spektrum« Juni 2016, S. 44). Sowohl innen als auch außen haben sie über einen sehr großen Bereich Kontakt zur Luft. Um diese Grenzfläche zu erschaffen, ist Energie nötig. Da die Natur stets dazu tendiert, maximal viel Energie an die Umgebung zu überführen (zweiter Hauptsatz der Thermodynamik), ist für die Gestalt einer Blase vor allem die Minimierung der Grenzflächenenergie entscheidend – und Kugeln schließen ein gegebenes Volumen mit der kleinstmöglichen Fläche ein. Noch mehr Energie sparen



H. JOACHIM SCHLICHTING

Milchschaum auf einem Cappuccino ist sehr robust. Das zeigt sich an den darauf lang haltbaren Mustern.

die Blasen, indem sie sich mit Nachbarn zusammantun und ihre Grenzflächen teilen. Dadurch wachsen Gebilde aus Polyedern heran (siehe Fotos rechts).

Reines Wasser lässt sich nicht aufschäumen, denn die entstehenden Blasen sind sehr instabil. Damit sie länger halten, braucht es zusätzlich so genannte grenzflächenaktive Stoffe. Seife sowie moderne Spül- und Waschmittel enthalten solche Tenside. Das sind Verbindungen mit einem Wasser liebenden und einem Wasser abweisenden Molekülteil. Sie verteilen sich dementsprechend auf den Grenzflächen und verringern die dortige Spannung. Anschaulich gesprochen senken Tenside den Drang der



H. JOACHIM SCHLICHTING

Blasengebilde bleiben stabil, während sie hoch über den Rand eines Gefäßes quellen.

einzelnen Blasen, sich sofort zu einer größeren zusammenschließen, wodurch der Schaum rasch zerfallen beziehungsweise gar nicht erst entstehen würde.

Bei Milch übernehmen vor allem Proteine die Rolle der Tenside. Die Eiweiße sorgen eigentlich als Emulgatoren dafür, dass die an sich nicht mischbaren Fett- und Wasserbestandteile miteinander auskommen. Die Moleküle umgeben die Fettteilchen, wobei sich die wasserverträglichen Bereiche nach außen richten. Wird nun die Milch mechanisch aufgeschlagen, trennt das die Verbindung von Fett und einhüllenden Eiweißen. Letztere sind jetzt wieder frei und besetzen die in den Blasen entstehenden Grenzflächen zwischen Luft und Wasser. Das stabilisiert den Schaum. Dazu müssen allerdings genügend Proteine vorhanden sein, was unter anderem von der Vorbehandlung der Milch abhängt.

Klebrige Krönung

Die flüssigen Wände der Schäume werden vor allem infolge der Schwerkraft und der Verdunstung im Lauf der Zeit immer dünner und platzen schließlich. Einige Stoffe erhöhen die Viskosität, machen die Blasen also zäher, und verlängern so deren Lebensdauer weiter. Bei Seifenschaum geben Profis Verbindungen wie Glycerin zu. Der Milchschaum auf dem Cappuccino enthält derartige Stabilisatoren insbesondere in Form von Zucker.

Etwas überspitzt könnte man sagen, Schaum ist ein fester Körper aus Flüssigkeit und Gas. Er entwickelt erstaunliche mechanische Eigenschaften und ist je nach seiner Zusammensetzung plastisch und elastisch, trägt leichte Gegenstände und schafft feste Verbindungen. Wenn man in einem Becher oder einer Flasche Schaum erzeugt, kann man das Behältnis umdrehen und noch so viel schütteln und rütteln – er lässt sich nicht vollständig entfernen.

Der Schaum auf dem Cappuccino wirkt also wie ein Deckel. Doch reicht das schon aus, um mögliche Bewegungen der Flüssigkeit zu dämpfen? Ein loser Pappdeckel auf einer Tasse mit normalem Milchkaffee kann jedenfalls ein Überschwappen nicht unterbinden. Vielmehr muss die Auflage fest auf dem Becher sitzen. Gerade diese



H. JOACHIM SCHLICHTING

Selbst über Kopf hält Schaum fest an der Wand.

Fixierung an die Gefäßwand leistet der Schaum in idealer Weise.

Das lässt sich wieder pauschal mit der Minimierung der Energie erklären. Zahlreiche Flüssigkeiten bilden leichter eine Grenzfläche zur Gefäßwand als zur Luft. Das erkennt man bereits an Wasser in einem Glas, das sich ein kleines Stück an der Wand hochzieht. Beim Schaum ist der Effekt auf Grund seiner Leichtbauweise wesentlich ausgeprägter. Um ihn gegen die Gefäßwand zu verschieben, braucht man entsprechend viel Kraft – umso mehr, je größer die Grenzfläche ist.

2014 haben Wissenschaftler der Princeton University in New Jersey zu dem Phänomen Modellexperimente durchgeführt. Dazu brachten sie mit einem kleinen Schlauch Schaum aus einer Lösung aus Wasser, Geschirrspülmittel und Glycerin (für die Langlebigkeit der Blasen) auf eine Flüssigkeit. Zunächst erzeugten sie einen einlagigen Blasenteppich, der durch seine Adhäsionskraft fest an den Gefäßwänden hielt. Anschließend versetzten sie den Versuchsaufbau in Schwingung. Sie erhöhten schrittweise die Schichthöhe und stellten fest: Schon bei fünf Blasenlagen war die Bremskraft so groß, dass das Getränk bei den typischen Gehbewegungen sicher im Gefäß blieb.

Die Erkenntnisse dienen freilich nicht nur den Konsumenten von Getränken wie Cappuccino oder Bier, wo die Krone ebenfalls dämpfend wirkt. Vielmehr lassen sie sich etwa auf den Transport von Flüssigkeiten in Tanklastern übertragen, bei denen das Schwappen zu ungleich größeren Problemen führen kann.

QUELLE

Sauret, A. et al.: Damping of liquid sloshing by foams. *Physics of Fluids* 27, 2015

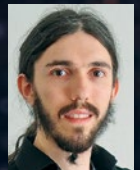


Die Sculptor-Zwerggalaxie begleitet unsere Milchstraße. Wegen ihrer Nähe zu uns lassen sich einzelne Sterne gut erkennen. Auf die Weise hat sie der Astronom Harlow Shapley 1937 als erste ihrer Art entdeckt.

ZWERGGALAXIEN KOSMISCHES PLANKTON

Die vielen kleinen Sternsysteme in unserer galaktischen Umgebung verhalten sich ganz anders, als es laut Simulationen zu erwarten wäre. Das passt nicht zum kosmologischen Standardmodell.

Oliver Müller arbeitet an der Universität de Strasbourg. Er beobachtet Zwerggalaxien im Umfeld der Milchstraße und benachbarter Galaxien und untersucht daran die Einflüsse Dunkler Materie und alternativer Gravitationstheorien. Er bloggt unter <https://scilogs.spektrum.de/prosa-der-astronomie/>.



EW SCHNIDER

» spektrum.de/artikel/1752450

AUF EINEN BLICK GALAKTISCHE AUSREISSER

- 1** Zwerggalaxien enthalten viel weniger Sterne als etwa die Milchstraße. Sie werden von größeren Galaxien eingefangen und tragen so nach und nach zu deren Wachstum bei.
- 2** Deswegen spielen die kleinen Objekte bei Computersimulationen zur Entwicklung des Universums eine wichtige Rolle. Doch die Berechnungen passen nicht gut zu den Beobachtungen.
- 3** Die seltsame Anordnung und Bewegung der Zwerggalaxien wirft Fragen auf: Handelt es sich um Ausnahmen, sind die Programme unvollständig – oder gibt es gar ein Problem mit der Theorie?

Wenn Sie sich die Lebewesen der Ozeane vorstellen – was kommt Ihnen zuerst in den Sinn? Sind es majestätische Wale, vielleicht auch Tintenfische, Delfine oder Haie? Vermutlich fällt Ihnen spontan vieles ein, nur nicht das Plankton. Dabei kommt im Meer nichts so zahlreich vor wie diese überall umherschwebenden Organismen. Beim Weltall ist es ganz ähnlich. Beim Gedanken an den Kosmos haben wir sofort Bilder von faszinierenden Spiralgalaxien und gewaltigen Nebeln mit bestechenden Formen und Farben vor Augen. Dagegen fristen andere Gebilde eine wenig beachtete Existenz, obwohl sie im Universum gewissermaßen den größten Nahrungsvorrat stellen: die Zwerggalaxien. Die kleinen Sternsysteme treiben das Wachstum der größeren Strukturen an.

Darum ist ein genauer Blick auf die Zwerggalaxien unverzichtbar, um das Zusammenspiel aller Objekte im Kosmos zu verstehen. In letzter Zeit häufen sich dabei Ungereimtheiten. Die Beobachtungen scheinen nicht gut zu den Vorhersagen des Standardmodells der Kosmologie zu passen, welches von der Existenz Dunkler Materie einer bis heute unbekanntes Natur ausgeht. Aber der Reihe nach.

In den 1930er Jahren hat Harlow Shapley vom Harvard-College-Observatorium in Cambridge, Massachusetts, eines der damals größten Teleskope der Welt auf den Nachthimmel gerichtet und einen erstaunlichen Fund gemacht: eine unbekanntes Art von Galaxie. Zu jener Zeit hatte Edwin Hubble bereits die unterschiedlichen Galaxientypen klassifiziert und eingeteilt. Auf der einen Seite die elliptischen, welche vor allem in Galaxienhaufen vorkommen, und auf der anderen die Spiralgalaxien, die eher in der kosmischen Einöde anzutreffen sind. Sie alle sind sehr weit von uns entfernt. Darum ist es fast unmöglich, ihre einzelnen Sterne zu sehen – die Galaxien erscheinen als verschmierte Lichtquellen. Shapley fand mit seinerzeit modernster Technik im südlichen Sternbild des Bildhauers



NASA / STS-130 CREW MEMBER

Mehr Wissen auf Spektrum.de

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

(Sculptor) ein seltsames, weit ausgedehntes Objekt. Es hatte den Charakter einer Galaxie, aber seine Bestandteile waren als einzelne Sterne zu erkennen. Es musste also quasi vor unserer Nase sitzen – ein Trabant, der die Milchstraße umkreist wie ein Mond einen Planeten! Zu der Annahme passen die Größenverhältnisse: Das Objekt hat nur die Leuchtkraft einiger Millionen Sonnen, während es bei der Milchstraße 200 Milliarden sind.

Heute nennen wir den von Shapley gefundenen Begleiter die Sculptor-Zwerggalaxie. Sie gilt als der Archetyp der Zwerggalaxien. Diese sind in ihrer Erscheinung sehr diffus, da sie nur über relativ wenige Sterne verfügen. Deshalb wirken sie wie trübe Flecken am Nachthimmel und sind nur

allzu leicht zu übersehen. Das macht es einerseits äußerst schwierig, sie überhaupt zu finden, aber andererseits spannend für Kosmologen. Denn die Zwerggalaxien besitzen zwar nur wenige Sterne, aber sie enthalten viel mehr von einer ganz anderen Komponente: der mysteriösen Dunklen Materie. Kein sonstiger Typ von Galaxien besitzt einen derart hohen Anteil daran. Und gerade weil Zwerggalaxien so wenig Sterne in sich vereinen, sind sie vergleichsweise einfach zu untersuchen. Das erleichtert es, mehr über die Dunkle Materie herauszufinden.

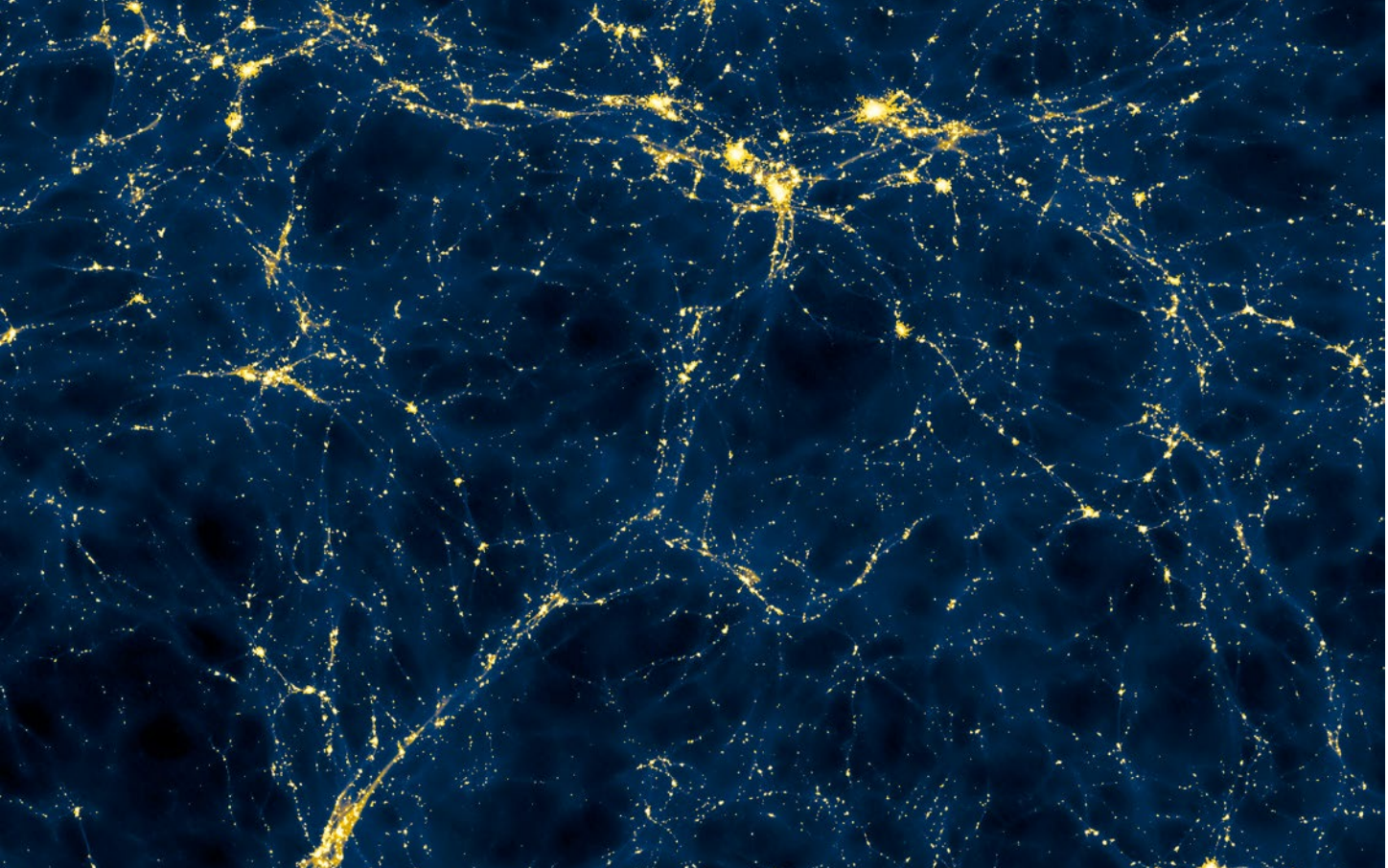
Anfang der Jahrtausendwende erhielt das Standardmodell der Kosmologie seine heutige Form. Es beruht auf der allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein und benötigt zusätzlich noch die Dunkle Materie und die Dunkle Energie. Letztere ist eine weitere Komponente mit unbekannter Ursache, welche die beobachtete Expansion des Kosmos antreibt. Dank rechenstarker Supercomputer bekamen Astronomen bald ein Bild davon, wie sich das Universum vom Urknall bis heute entwickelt haben könnte. Grundsätzlich bilden sich zuerst kleine Strukturen – die Zwerggalaxien –, die verschmelzen und dadurch immer größere hervorbringen. Die Endprodukte sind dann Galaxien wie unsere Milchstraße. Wie Wale, die sich von Plankton ernähren, müssen sie sich unzählige der kleinen Zwerggalaxien einverleiben, um zu wachsen. Die kosmologischen Simulationen legen nahe, dass die Zwerggalaxien die Bausteine aller komplexeren Galaxien sind. Wäre da nicht ein Problem.

Eine Ungereimtheit scheint beseitigt, doch eine andere bleibt

Den Simulationen zufolge waren die großen Galaxien bei ihren Mahlzeiten alles andere als gründlich. Sie ließen Hunderte von Zwerggalaxien unberührt, welche sie heute wie Bienen umschwirren sollten. Das ist eine Voraussage der Computermodelle – und somit des kosmologischen Standardmodells, auf dem sie basieren.

Wie sieht es um die reale Milchstraße herum aus? Shapley fand noch im Jahr seiner ersten Entdeckung eine zweite Zwerggalaxie im Sternzeichen des chemischen Ofens (Fornax). Jedoch vergingen danach jeweils Jahrzehnte, bis weitere Exemplare auftauchten. Bis Ende der 1990er Jahre waren bloß etwa zehn solcher Begleiter unserer Galaxis bekannt. Verglichen mit den berechneten mehr als 1000 ist das erschreckend wenig.

Dieses so genannte Problem der fehlenden Satelliten (englisch: missing satellites problem) wurde zu einem wichtigen Mysterium in der modernen Kosmologie. Heute, zwei Jahrzehnte später, sehen Astronomen es aber beinahe als beseitigt an. Denn erstens ist die Anzahl der neu entdeckten Zwerggalaxien um die Milchstraße in den letzten Jahren markant gestiegen – inzwischen sind etwa 50 Stück bekannt. Zweitens ermöglichte immer bessere Rechenleistung präzisere Vorhersagen auf den Skalen von Zwerggalaxien, und die kosmologischen Simulationen konnten wichtige Effekte mit einbeziehen. Berücksichtigen wir zum Beispiel auch Supernovae, sehen wir, dass die bei den Sternexplosionen freigesetzte Energie Zwerggalaxien manchmal regelrecht auseinanderreißt. Das passiert vor



UCL MATHEMATICAL & PHYSICAL SCIENCES, ANDREW PONTZEN AND FABIO GONZATO / LARGE-SCALE STRUCTURE OF LIGHT DISTRIBUTION IN THE UNIVERSE (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/CUMAPS/159514804751//CC-BY-3.0/CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/3.0/LEGALCODE)

Aufwändige Computersimulationen stellen auf Basis des kosmologischen Standardmodells die Entwicklung des Alls dar. Es entstehen Netze von sichtbarer und Dunkler Materie, die wie hier viele Millionen Lichtjahre überspannen und im Großen und Ganzen wie die heute beobachteten Strukturen aussehen. In Details gibt es jedoch Unstimmigkeiten.

allein bei den sehr leuchtschwachen Zwerggalaxien, welche laut den Modellen am häufigsten vorkommen müssten. Indem also einerseits bei Beobachtungen laufend mehr Zwerggalaxien um die Milchstraße auftauchten und andererseits deren vorhergesagte Anzahl insgesamt sank, schien sich das Problem der fehlenden Satelliten aufzulösen.

Aber ein weiterer Widerspruch blieb bestehen. Ein Team um Pavel Kroupa von der Universität Bonn hat sich 2005 mit der räumlichen Verteilung der Zwerggalaxien befasst und dabei festgestellt: Die kosmologischen Simulationen ergeben hier ebenfalls etwas anderes als in Wirklichkeit beobachtet. Seit den 1970er Jahren ist bekannt, dass sich die Zwerggalaxien in einer Art dünner Scheibe senkrecht zur Milchstraße verteilen. Die Entdeckungen weiterer Exemplare haben das Bild sogar verstärkt. Laut Kroupa verteilen sich die Zwerggalaxien hingegen wie eine Wolke zufällig um die Hauptgalaxie. Den Computermodellen zufolge sollte eine Scheibenstruktur nur bei einem halben Prozent der Galaxiengruppen vorkommen. Das Milchstraßensystem wäre demnach ein Ausreißer. Das kommt hin und wieder vor – würden wir zum Beispiel die nächsten 1000 Galaxien untersuchen, wäre bei etwa fünf eine solche Scheibe aus Zwerggalaxien zu erwarten.

Wie sieht es bei unseren Nachbargalaxien tatsächlich aus? Der Frage haben sich Andreas Koch und Eva Grebel, damals noch an der Universität Basel (heute sind beide an der Universität Heidelberg) gleich nach Kroupas Untersuchung gewidmet. Dabei betrachteten sie unsere Nachbargalaxie Andromeda. Sie ist wie die Milchstraße eine große Spiralgalaxie und somit im doppelten Sinn die nächstgelegene Wahl für eine solche Studie. Kochs und Grebels Ergebnis war erstaunlich: Auch um die Andromedagalaxie liegen die Zwerggalaxien in einer dünnen Scheibe. Ein zweiter Ausreißer im kosmologischen Modell!

Wenig später kam ein weiterer Fund hinzu. Auf Basis präziser Messungen der Bewegung der Sterne in den Zwerggalaxien der Milchstraße stellte Kroupas Forschungsgruppe fest, dass die meisten Zwerggalaxien innerhalb der Scheibe und im gleichen Drehsinn kreisen – ähnlich wie die Planeten um die Sonne. Dieser koordinierte Tanz ist verwunderlich, denn laut der kosmologischen Simulationen sollten die Bahnen der Zwerggalaxien eher chaotisch verlaufen und keinesfalls derart regelmäßig sein. Heute heißt der Widerspruch das Satellitenebenen-Problem (plane-of-satellites problem).

Kaum genutzte Weltraum-Autobahnen

Warum sagen die Modelle zufällig rotierende und wahllos verteilte Satellitensysteme voraus? Die Antwort auf die Frage führt zurück zum Anfang der Geschichte des Universums. Es war kurz nach dem Urknall extrem homogen, das heißt, in der Verteilung von Energie und Materie gab es nur kleine Dichteschwankungen. Diese reichten aber aus, um unter Einwirkung der Gravitation im Lauf der Zeit in den etwas stärker konzentrierten Bereichen weitere Materie anzusammeln. Währenddessen verloren die weniger dichten

ten Regionen Materie. Solche Hohl- oder Leerräume nennen die Fachleute Voids. Mit der Zeit entstand ein kosmisches Netz aus fadenartig angeordneter Materie und Voids dazwischen. In den Knotenpunkten der Filamente sitzen die massereichen Galaxien wie die Milchstraße. Sie haben mit ihrer starken Gravitationskraft entlang der Filamente viele Zwerggalaxien zu sich gezogen. Die großen Galaxien werden immer von mehreren Filamenten aus unterschiedlichen Richtungen gespeist. Darum gibt es für die Zwerggalaxien viele mögliche Einfallsrichtungen – und entsprechend sollten ihr Drehsinn sowie ihre Anordnung keine Vorzugsrichtung aufweisen.

Nun könnte man vermuten, es müsse doch geometrische Konstellationen von Filamenten geben, die flache Strukturen um Spiralgalaxien begünstigen. Und tatsächlich tauchten kurz nach Kroupas Fund solche abgeplatteten Galaxiengruppen in den Simulationen auf. Nur sind sie trotzdem um einiges größer als das, was wir bei den Zwerggalaxien um die Milchstraße beobachten. Die Satellitenebene ist in Wirklichkeit rund 20 Kiloparsec dick (ein in der Astronomie übliches Längenmaß – ein Parsec entspricht etwa 3,3 Lichtjahren), die Filamentdurchmesser hingegen betragen 200 Kiloparsec und mehr. Das ist, als würden auf einer Autobahn mit zehn Spuren seltsamerweise alle Autos nur auf der mittleren fahren. Um derart gestauchte Strukturen zu erklären, müssten die Zwerge ausschließlich entlang

Die Galaxie Centaurus A ist etwa 13 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Die senkrecht zur Staubscheibe ausgeworfene Strahlung und Materie stammen von einem Schwarzen Loch im Zentrum.

der Hauptadern der Filamente einfallen. Einen erkennbaren physikalischen Grund dafür gibt es nicht.

2013 hat ein Team um Rodrigo Ibata am Observatoire de Strasbourg die Bewegungen der Zwerggalaxien um die Andromedagalaxie bestimmt. Da sich die Objekte so weit weg von uns befinden, lassen sich die Positionsänderungen in Teleskopen zwar nicht räumlich auflösen. Aber die Wellenlängen ihres Lichts verschieben sich bei Bewegungen entlang unserer Sichtlinie messbar. Der Unterschied prägt sich dem Spektrum abhängig von der Geschwindigkeit zu uns hin oder von uns weg – das ist der bekannte Dopplereffekt. Glücklicherweise steht die Ebene der Zwerggalaxien mit der Kante zu uns. Das heißt, falls diese sich innerhalb dieser Ebene um die Andromedagalaxie drehen, müsste die eine Seite in den roten und die andere in den blauen Bereich des Spektrums verschoben sein. Genau das stellte sich bei der Untersuchung heraus! Auch dort laufen also Zwerggalaxien im Gleichsinn innerhalb einer dünnen Ebene herum – wie bei den Begleitern der Milchstraße.

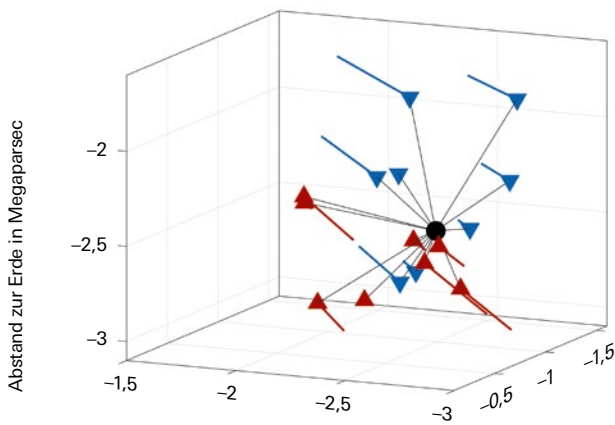
Ein dritter Ausreißer?

Zu jener Zeit begann ich meine Doktorarbeit in Astronomie an der Universität Basel. Meine Betreuer Bruno Binggeli in Basel sowie Helmut Jerjen von der National University of Australia in Canberra und ich stellten uns die Frage, ob unsere so genannte Lokale Gruppe aus Andromedagalaxie und Milchstraße einfach ein Ausreißer im kosmologischen Modell ist oder ob andere Galaxiengruppen ebenfalls solche unerwarteten Eigenschaften besitzen. Darum fahndeten wir an solchen Orten nach Zwerggalaxien. Wir begannen mit der Centaurus-Gruppe am südlichen Firmament und verwendeten die Dark Energy Camera an einem der besten Teleskope der Welt in Chile. Die Centaurus-Gruppe besteht wie unsere Lokale Gruppe aus zwei großen Galaxien: Centaurus A, einer elliptischen Galaxie, und Messier 83, einer Spiralgalaxie ähnlich der Milchstraße. Dazu kommt eine Hand voll Zwerggalaxien. In einer Beoberkungskampagne zwischen 2014 und 2015 durchforsteten wir mehr als 500 Quadratgrad am Sternenhimmel, um die ganze Centaurus-Gruppe zu erfassen. Das entspricht einer Fläche von 2000 Vollmonden. Am Ende hatten wir die Anzahl ihrer bekannten Zwerggalaxien verdoppelt.

Zur gleichen Zeit hat ein Team um Brent Tully vom Institute for Astronomy in Hawaii die um Centaurus A bereits identifizierten Zwerggalaxien untersucht und festgestellt, dass diese dort ebenfalls nicht sphärisch, sondern flach verteilt waren. Das konnten wir an den von uns neu entdeckten Zwerggalaxien gleich überprüfen. Auch mit ihnen sieht das Satellitensystem von Centaurus A relativ flach aus, wenngleich nicht ganz so sehr wie bei der Milchstraße. Das ist aber verständlich, da Centaurus A einiges mehr an Masse aufweist und somit eine insgesamt größere Struktur zu erwarten wäre. Als wir die dreidimensionale Anordnung studierten, fiel uns etwas Grundlegendes auf: Die Ebene der Zwerggalaxien um Centaurus A steht wie bei der Andromedagalaxie mit der Kante auf unserer Sichtlinie. Somit konnten wir auch hier testen, ob die Zwerggalaxien auf der einen Seite rot- und auf der anderen blauverschoben erscheinen, ob also das Satellitensystem von Centau-



OPTISCHES KOPFER: SUBMILLIMETER-IMPRERS/APEX/VESSLET AL., BÄNTERTEL: NASA/COSMOS/IRAF/TET AL.
(WWW.ESO.ORG/PUBLICIMAGES/SDSS08304) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)



Die 16 vom Autor untersuchten Zwerggalaxien umkreisen die Galaxie Centaurus A (schwarzer Punkt) weitgehend in einer Ebene: Auf der einen Seite bewegen sie sich von uns aus gesehen weg (rote Dreiecke, die Länge der Striche kennzeichnet die Geschwindigkeit), auf der anderen zu uns hin (blaue Dreiecke).

rus A ebenfalls aus einer sich drehenden Ebene besteht. Zu 16 der bekannten Zwerggalaxien um Centaurus A fanden wir in der Fachliteratur bereits Geschwindigkeitsmessungen. Wir trugen die Positionen und Werte auf und waren verblüfft: 14 der 16 Trabanten bewegten sich so, wie es bei einem rotierenden System zu erwarten war. Das war unter den bisher drei untersuchten Fällen der dritte, wo sich die Zwerggalaxien nicht entsprechend der Modelle verhalten.

Mein Kollege Marcel Pawlowski, heute am Leibniz-Institut für Astrophysik in Potsdam, verglich die Beobachtungen um Centaurus A mit den derzeit besten kosmologischen Simulationen. Er fand dieselben Wahrscheinlichkeiten wie für die Milchstraße – die Situation kommt in nur etwa einem halben Prozent der berechneten Fälle vor. Eigentlich hätte man über eine Million Galaxiengruppen beobachten müssen, um das Milchstraßen-, das Andromeda- und das Cen-A-System genau nacheinander zu finden. Hatten wir nur extremes Glück, oder steckt mehr dahinter?

Viele Ideen, doch keine heiße Spur

Die Frage, ob solche rotierenden Satellitenstrukturen das kosmologische Modell nun arg in Bedrängnis bringen oder ob wir die Bedeutung der Zwerggalaxien überinterpretieren, wird seither in Fachkreisen heiß diskutiert. Für Noam Libeskind vom Leibniz-Institut für Astrophysik in Potsdam handelt es sich beispielsweise um eine Besonderheit unserer galaktischen Umgebung. Die drei Galaxien befinden sich am Rand einer großen Void des kosmischen Netzes und scheinen mehr oder weniger danach ausgerichtet zu sein. Die Ausdehnung der Void könnte flache Ebenen begünstigen, wie bei einem Ballon, dessen Gummihaut beim Aufblasen immer dünner wird. Neben der Ausdehnung des Hohlraums verstärkt der massereiche Virgo-Galaxienhaufen den Effekt, denn dieser zieht zusätzlich gravitativ an den Ebenen, und zwar genau von deren Kanten her. Wie durch das kosmische Pressen und Zerren aber

die Rotation zu Stande kommen könnte, ist noch ein offenes Problem. Für Kroupa hingegen ist die Sache klar: Die Simulationen sagen die Beobachtungen nicht zufriedenstellend voraus, also muss das zu Grunde liegende Modell der Dunklen Materie falsch sein.

Bessere Computerberechnungen lösen das Satelliten-ebenen-Problem bislang nicht, wie es im Fall der fehlenden Satelliten gelungen ist. Im Gegenteil, die Wahrscheinlichkeiten für solche rotierenden Schichten von Zwerggalaxien wurden sogar kleiner. Andererseits kann das Modell trotzdem sehr viele andere Phänomene sehr genau beschreiben – und wegen einer Unstimmigkeit muss nicht gleich die ganze Kosmologie über den Haufen geworfen werden.

Wie geht es nun weiter? In einer Beobachtungskampagne mit dem größten optischen Teleskop der Südhemisphäre, dem Very Large Telescope, beobachten wir gemeinsam mit Marina Rejkuba, Michael Hilker und Katja Fahrion an der Europäischen Südsternwarte weitere Zwerggalaxien um Centaurus A. Wir wollen überprüfen, ob die von uns neu gefundenen Exemplare in gleicher Weise rotieren. Auch andere Fachleute suchen nach Zwerggalaxien um weiter entfernte Galaxien und haben sogar Hinweise auf Anordnungen in Ebenen gefunden. Genauere dreidimensionale Positionsmessungen werden dabei helfen, die rotierenden Systeme zu verstehen. Zudem versuchen wir zu überprüfen, ob sie doch mit dem Standardmodell der Kosmologie vereinbar sind. Eine unserer Ideen: Gigantische Galaxienkollisionen könnten das Phänomen hervorbringen. Zumindest Centaurus A hat gerade eine solche hinter sich. Darüber hinaus suchen wir nach Ansätzen, die entweder die Eigenschaften der Dunklen Materie im Standardmodell verändern – oder sogar die Gravitationstheorie selbst. Die modifizierten Gravitationstheorien befinden sich aber noch in den Kinderschuhen und können sich noch nicht mit den vielen übrigen Erfolgen des Standardmodells messen (siehe »Spektrum« September 2019, S. 50).

Eines jedenfalls wurde in den letzten Jahrzehnten klar: Wollen wir das Rätsel der Dunklen Materie lüften, dann müssen wir die seltsamen Phänomene rund um die Zwerggalaxien verstehen. Denn wir haben im Universum gerade erst damit begonnen, Licht ins Dunkle seiner kleinsten Strukturen zu bringen. ◀

QUELLEN

Kroupa, P. et al.: The great disk of Milky-Way satellites and cosmological sub-structures. *Astronomy & Astrophysics* 431, 2005

Libeskind, N. I. et al.: Planes of satellite galaxies and the cosmic web. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 452, 2015

Müller, O. et al.: A whirling plane of satellite galaxies around Centaurus. A challenge to cold dark matter cosmology. *Science* 359, 2018

Pawlowski, M. S.: The planes of satellite galaxies problem, suggested solutions, and open questions. *Modern Physics Letters A* 33, 2018

Tully, R. B. et al.: Two planes of satellites in the Centaurus A group. *Astrophysical Journal* 802, 2015

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN RÄTSELHAFTE NULLSTELLEN

Eine abstrakt definierte Menge in der komplexen Ebene liefert ein unerwartetes Bild, das fraktale Strukturen zeigt. Inzwischen haben die Mathematiker einige Erklärungen dafür gefunden.

Christoph Pöppe war Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«, zuständig vorrangig für Mathematik und Informatik.

» spektrum.de/artikel/1752452

► Die Beziehung zwischen einem Problem und seinen Lösungen ist – nun ja – eben problematisch. Das gilt insbesondere für die Lieblingsprobleme der Algebraiker, die Polynomgleichungen.

Es geht darum, für welche Zahlen z ein Polynom, das heißt eine Funktion der Form $p(z) = z^n + a_{n-1}z^{n-1} + \dots + a_2z^2 + a_1z + a_0$, den Wert null annimmt. Diese Lösungen der Gleichung $p(z) = 0$ heißen die Nullstellen des Polynoms p und die Konstanten a_0, a_1, \dots, a_{n-1} seine Koeffizienten. Die höchste vorkommende Potenz von z , die oben mit n bezeichnet ist, nennt man die Ordnung des Polynoms. Und wenn es nur auf die Nullstellen ankommt, darf man sich auf den Fall beschränken, dass der höchste Koeffizient a_n gleich eins ist. (Wäre er ungleich eins, könnte man das ganze Polynom durch a_n dividieren, ohne dass sich an den Nullstellen etwas ändert: Wenn $p(z) = 0$ ist, dann ist offensichtlich auch $p(z) / a_n = 0$.)

Die gute Nachricht lautet: Auf die Frage, ob eine Polynomgleichung überhaupt Lösungen hat, gibt es eine erschöpfende Antwort. Der Fundamentalsatz der Algebra sagt, dass ein Polynom der Ordnung n stets genau n Nullstellen besitzt. Man muss allerdings damit rechnen, dass es sich um komplexe Zahlen handelt, also zusammengesetzt aus einer reellen Zahl und einem Vielfachen der imaginären Einheit i , die man sich als Wurzel aus -1 vorzustellen hat. Komplexe Zahlen stellt man dar, indem man den Realteil entlang der x -Achse und den Imaginärteil entlang der y -Achse aufträgt. Irgendwo in dieser komplexen Zahlenebene liegen also die Nullstellen eines Polynoms.

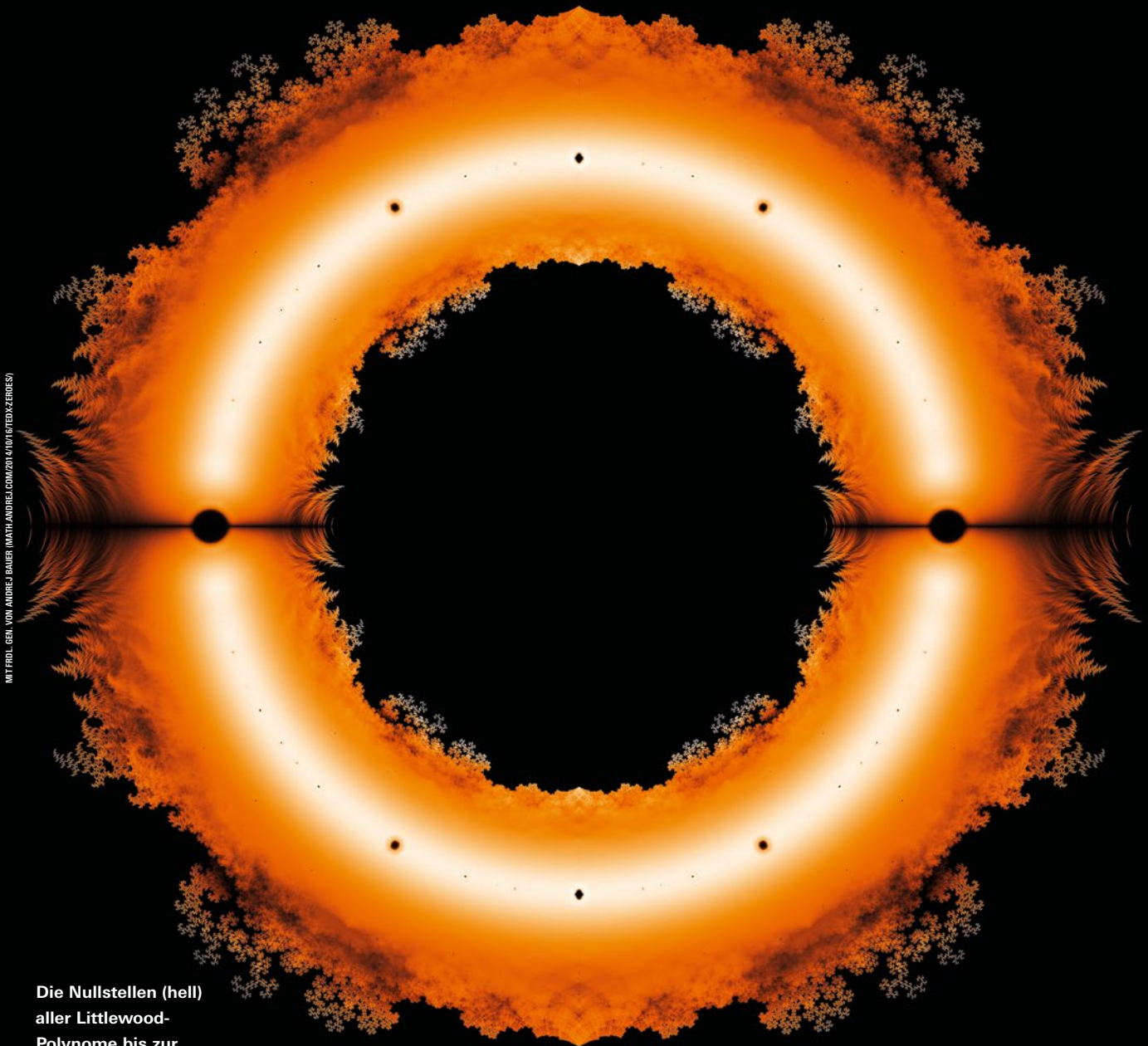
Die schlechte Nachricht: Darüber, wo die Nullstellen in der Ebene liegen, sagt einem das Polynom herzlich wenig. Man kann sie zwar im Einzelfall mit geeigneten Näherungsverfahren ausrechnen; aber allgemeine Aussagen der Art »wenn die Koeffizienten klein sind, dann liegen auch die Nullstellen in der Nähe des Nullpunkts« sind nicht zu haben.

An dieser Stelle hat John Edensor Littlewood (1885–1977), zu seiner Zeit wie auch Godfrey Harold Hardy eine dominierende Figur der englischen Mathematik, genauer hingeschaut. In einer Reihe von Arbeiten in den 1950er und 1960er Jahren zeigte er, dass die Koeffizienten nicht in erster Linie klein sein müssen, um die Nullstellen im Zaum zu halten. Vielmehr kommt es darauf an, dass sie alle annähernd dieselbe Größenordnung haben.

Die Nullstellen einkreisen

Oder sogar alle gleich plus oder minus eins sind. Diesen Extremfall hat Littlewood genauer untersucht, mit dem Ergebnis, dass die Nullstellen der Polynome sich nicht allzu fern vom Einheitskreis in der komplexen Ebene aufhalten; das ist der Kreis um den Nullpunkt mit Radius 1.

Nachdem man dank dem enormen Anstieg der Computerleistung Millionen und Abermillionen von Polynomgleichungen in erträglicher Zeit lösen kann, haben etliche Leute die Sache wieder aufgegriffen. Sie ließen ihre Rechner die Nullstellen der Polynome mit den Koeffizienten ± 1 , die inzwischen allgemein »Littlewood-Polynome« heißen, bestimmen und in der komplexen Ebene eintragen. John



Die Nullstellen (hell) aller Littlewood-Polynome bis zur Ordnung 26.

Baez, mathematischer Physiker von der University of California in Riverside, hat der Menge dieser Nullstellen – nennen wir sie L zu Ehren Littlewoods – eine Ausgabe seiner bekannten Internetkolumne »This Week's Finds in Mathematical Physics« gewidmet. Im Dialog mit etlichen Kollegen wuchs in dieser Kolumne allmählich eine ganze Theorie der Menge L heran. Und wie man im Bild oben sieht, hat L etliche bemerkenswerte Eigenschaften.

An der Peripherie des leuchtenden Rings erkennt man sogar so etwas wie selbstähnliche Strukturen (siehe Bild, S. 77). Das hat die Menge L mit der wesentlich berühmteren Mandelbrot-Menge gemeinsam: Sie ist nicht selbst ein Fraktal, gleicht aber an gewissen Stellen bei hinreichender Ausschnittsvergrößerung echten Fraktalen (siehe »Spekt-

rum« September 1989, S. 52). Im Fall der Mandelbrot-Menge sind das die so genannten Julia-Mengen; die entsprechenden Strukturen zur Menge L haben noch keinen offiziellen Namen.

Aber fangen wir mit den offensichtlichen Dingen an. Auf den ersten Blick erkennt man, dass L doppelt spiegelsymmetrisch ist, bezüglich Spiegelung an der waagerechten (reellen) sowie der senkrechten (imaginären) Achse. Etwas genauer hinschauen muss man für die dritte Symmetrie, nämlich die gegenüber der Inversion am Einheitskreis: Die Menge L hat nach innen dieselben Auswüchse wie nach außen, nur entsprechend verkleinert. In der Sprache der komplexen Zahlen läuft das auf die Aussage hinaus: L ist invariant gegenüber der Transforma-

tion, die z auf $1/z$ abbildet (siehe »Symmetrien der Menge L «, unten).

Und warum herrscht im Inneren des Rings so eine gähnende Leere? Denken wir zuerst einmal nur über reelle Zahlen z nach, sagen wir z zwischen null und einhalb, und versuchen ein Polynom zurechtzubasteln, das z als Nullstelle hat. Dazu schlagen wir zunächst in Gedanken einen Pflock bei der Zahl eins ein; das ist der Koeffizient a_0 . In den hängen wir für den Term $a_1 z$ ein gelochtes Metallband aus dem Metallbaukasten ein; das hat nur zwei Löcher im Abstand z und kann nach rechts oder links weisen. An dem anderen Loch befestigen wir ein Band der Länge z^2 , das den zweiten Term $a_2 z^2$ in dem Polynom vertritt und wieder nach rechts oder links weisen kann, daran eines der Länge z^3 und so weiter. Schnell wird klar, dass man mit dieser Bänderkette die Null nie erreichen wird; denn z ist schon kleiner als einhalb, z^2 kleiner als ein Viertel, und so weiter. Selbst wenn die Kette beliebig viele Glieder hat und die alle nach links weisen, reicht es nicht bis zur Null, denn nach der Formel für die geometrische Reihe ist selbst die Summe unendlich vieler Kettengliedertängen nur gleich $z / (1 - z)$, und das ist kleiner als eins. Und wenn wir den Pflock bei minus eins statt bei eins einschlagen (die

andere Möglichkeit für den Koeffizienten a_0), ergibt sich dasselbe Bild, nur unter Vertauschen von rechts und links.

Das wird nicht besser, wenn man allgemeiner komplexe Zahlen z mit einem Betrag (Abstand vom Nullpunkt) kleiner als einhalb betrachtet. Wieder entspricht das Polynom einer Kette von Lochbändern abnehmender Länge. Diesmal weisen die Kettenglieder nicht nach rechts oder links, sondern im Allgemeinen in eine andere Richtung, und aufeinanderfolgende Glieder liegen in einem bestimmten Winkel zueinander. Aber die neue Freiheit nutzt nichts, im Gegenteil: Auch die unendliche Gliederkette bleibt der Null fern, noch ferner als zuvor.

Fraktale Strukturen

Und wenn der Betrag von z größer als zwei wäre? Dann würden die Kettenglieder immer länger statt kürzer, und wählt man zusätzlich den Winkel geeignet, müsste doch die Null irgendwie erreichbar sein. Eben nicht. Wir wissen schon, dass die Menge L inversionssymmetrisch ist. Wenn für alle z mit Betrag unter einhalb nichts ist, kann auch für z außerhalb des Kreises mit Radius zwei nichts sein.

Wie kommen nun diese Strukturen (siehe Bild unten) zu Stande, die man aus der fraktalen Geometrie kennt und

Symmetrien der Menge L

Das Spiegelbild einer komplexen Zahl $z = x + iy$ bezüglich der horizontalen Achse ist die Zahl $x - iy$. Man nennt sie die zu z komplex konjugierte Zahl und bezeichnet sie mit \bar{z} . Allgemein bezeichnet die komplexe Konjugation die Operation, die den Imaginärteil einer komplexen Zahl durch sein Negatives ersetzt. Es gelten die Rechenregeln $\overline{a + b} = \bar{a} + \bar{b}$ und $\overline{ab} = \bar{a}\bar{b}$. Für jedes Polynom p mit reellen Koeffizienten gilt daher $p(\bar{z}) = \overline{p(z)}$, denn die Auswertung der Funktion p besteht nur aus Additionen und Multiplikationen, und das Konjugierte einer reellen Zahl ist die Zahl selbst. Wenn insbesondere $p(z) = 0$ ist, dann ist auch $p(\bar{z}) = \overline{p(z)} = \bar{0} = 0$. Also ist z eine Nullstelle von p genau dann, wenn \bar{z} eine ist, was die Spiegelsymmetrie bezüglich der reellen Achse erklärt.

Wenn z ein Element von L ist, das heißt, wenn es ein Littlewood-Polynom mit der Eigenschaft $p(z) = 0$ gibt, ist zwar $p(-z)$ im Allgemeinen nicht gleich null, weil die Terme mit den ungeraden Potenzen von z das falsche Vorzeichen haben. Aber wenn man bei den Koeffizienten mit den ungeraden Nummern das Vorzeichen umdreht, ist das so entstehende Polynom wieder ein Littlewood-Polynom, und sein Wert bei $-z$ ist null, weil $p(z) = 0$ ist. Also ist auch $-z$ ein Element von L . Daraus folgt, dass die Menge L punktsymmetrisch bezüglich des Nullpunkts ist.

Anders ausgedrückt, L geht durch eine Halbdrehung um den Nullpunkt in sich über. Da eine Spiegelung an der Horizontalen, gefolgt von einer solchen Halbdrehung, dasselbe ist wie eine Spiegelung an der Vertikalen, ist die Menge L auch rechts-links-symmetrisch.

Um die Symmetrie bezüglich der Abbildung $z \rightarrow 1/z$ zu zeigen, nehmen wir an, dass $1/z$ ein Element von L sei. Es gibt also ein Littlewood-Polynom p mit der Eigenschaft:

$$p\left(\frac{1}{z}\right) = \frac{1}{z^n} + a_{n-1} \frac{1}{z^{n-1}} + \dots + a_2 \frac{1}{z^2} + a_1 \frac{1}{z} + a_0 = 0$$

Wir multiplizieren diese Gleichung mit z^n und erhalten:

$$z^n p\left(\frac{1}{z}\right) = 1 + a_{n-1} z + \dots + a_2 z^{n-2} + a_1 z^{n-1} + a_0 z^n = 0$$

Das ist nichts weiter als ein anderes Littlewood-Polynom. Es hat sogar dieselben Koeffizienten wie p , nur in der umgekehrten Reihenfolge. Also ist auch z Element von L , was zu beweisen war.

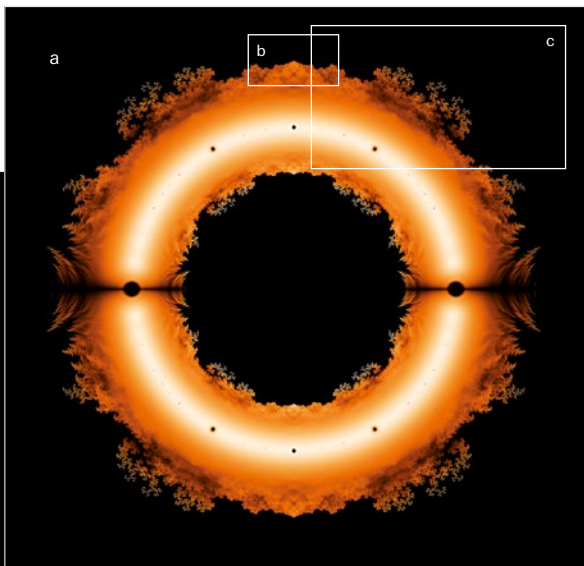
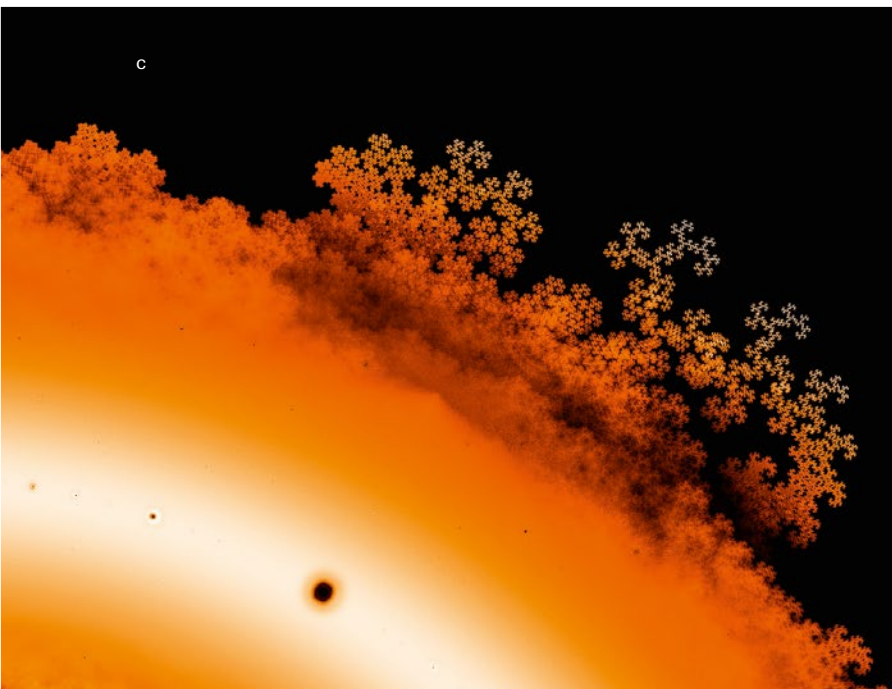
Die Inversion am Einheitskreis ist übrigens nicht die Abbildung $z \rightarrow 1/z$, sondern $z \mapsto 1/\bar{z}$. Aber da die Menge L sowieso symmetrisch gegenüber komplexer Konjugation ist, kommt es hierauf nicht an.

die Selbstähnlichkeit zeigen, also so aussehen, als könnte man einen kleinen Ausschnitt vergrößern und dann passgenau auf die Gesamtstruktur legen? John Baez und seine Fachkollegen haben 2009 im Internet noch ausgiebig herumgerätselt; inzwischen sind ihre Überlegungen zu einer richtigen Theorie herangereift. Statt bei den Littlewood-Polynomen zu beginnen, startet sie bei einem bekannten Verfahren zur Erzeugung selbstähnlicher Strukturen.

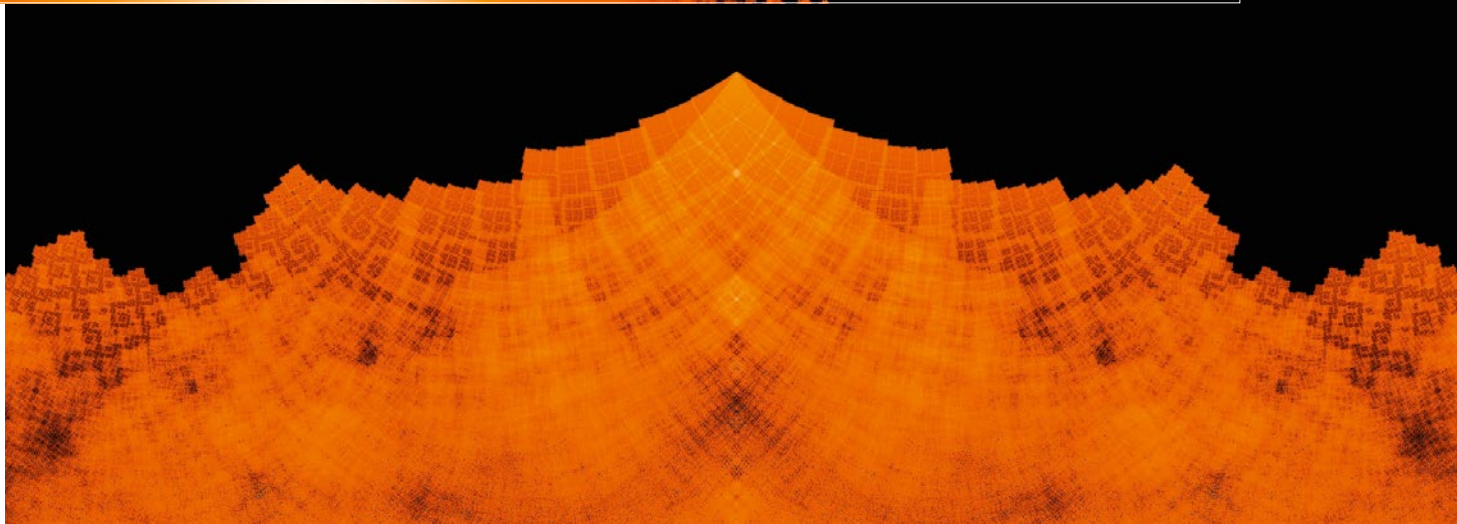
Es handelt sich um ein fiktives Kopiergerät, das seine Vorlage nicht nur verkleinert abbildet, sondern von dieser Vorlage mehrere verkleinerte und in verschiedene Richtungen verschobene und verdrehte Abbilder auf das Papier druckt: die Mehrfach-Verkleinerungs-Kopiermaschine (MVKM, siehe »Spektrum« September 1989, S. 52). Man legt die soeben gefertigte Kopie als neue Vorlage auf die Maschine, ebenso verfährt man mit deren Kopie, und so weiter bis ins Unendliche.

Das klassische Beispiel einer MVKM produziert in jedem Schritt drei Abbilder ihrer jeweiligen Vorlage, mit dem Faktor einhalb verkleinert und von der Mitte zu den Spitzen eines Mercedessterns verschoben. Das Ergebnis der unendlichfachen Anwendung ist das Sierpiński-Dreieck (siehe Bild, S. 78).

Die Menge L der Nullstellen aller 268435452 Littlewood-Polynome bis zur Ordnung 26: Je heller der Farbton eines Punkts, desto mehr dieser Nullstellen finden sich in seiner Umgebung. Die beiden auffälligen Löcher inmitten der »schwarzen Gürtel« rechts und links entsprechen den (reellen) Zahlen 1 und -1 . Die imaginäre Einheit i (oben) ist ebenso wie ihr Negatives $-i$ (unten) durch ein kleineres Loch vertreten. Andrej Bauer, Professor für Mathematik an der Universität Ljubljana, hat dieses Bild angefertigt, indem er sämtliche 6979321752 Nullstellen vom Computer berechnen ließ. Littlewood-Polynome haben auch reelle Nullstellen, so dass das Bild eine waagerechte Linie enthalten müsste. Bauer hat sie gelöscht, was er mit »künstlerischer Freiheit« begründet. Bild a zeigt vergrößerte Ausschnitte (weiße Rechtecke) in der Umgebung der Punkte $1,4i$ (b) und $3e^{7im/24} / 2$ (c). Man erkennt selbstähnliche Strukturen verschiedener Art.



MIT FOL. GEN. VON ANDREJ BAUER
(MATH.ANDREJ.COM/2014/10/16/EDX-
ZERNEST. ENGEZEICHNETE RAHMEN:
CHRISTOPH PÖPPE



b

In unserem Fall macht die MVKM nur jeweils zwei Abbilder, die durch die Funktionen $f_{z+}(x) = 1 + zx$ und $f_{z-}(x) = 1 - zx$ beschrieben werden. Der komplexe Parameter z ist der Verkleinerungsfaktor und muss daher einen Betrag kleiner als eins haben. Die wiederholte Anwendung der MVKM entspricht der Iteration der beiden Funktionen: Man ersetzt immer wieder die Variable x durch $1 + zx$ oder $1 - zx$ und erhält dadurch ein Ensemble immer komplizierter Funktionen wie: $1 + z(1 - z(1 - z(1 + z(1 + zx))))$, ein »iterated function system« (IFS). Und siehe da: Setzt man in jeder dieser iterierten Funktionen für x den Wert null ein und löst alle Klammern auf, erhält man genau die Littlewood-Polynome in der Variablen z . Diesmal ist das Vorzeichen des nullten Koeffizienten a_0 festgelegt und das des höchsten variabel; aber auch diese Einschränkung ändert nichts Wesentliches.

Also bilden die Werte aller Littlewood-Polynome für ein und dieselbe Zahl z eine selbstähnliche Menge beziehungsweise ein Fraktal. Wenn der Parameter z keine reelle Zahl ist, kommt zu der Verkleinerung noch eine Drehung hinzu. Dadurch nimmt das Fraktal eine Form wie in Bild c) auf S. 77 an, die als »dragon« in der Literatur bekannt ist; eine gewisse Ähnlichkeit mit einem mythologischen Drachen ist in der Tat nicht von der Hand zu weisen.

Aber eigentlich ging es doch nicht um die Werte dieser Polynome, sondern um deren Nullstellen! Richtig; doch unter gewissen Umständen kann man die einen in die



Wenn man auf eine geeignete Dreifach-Verkleinerungs-Kopiermaschine als erste Vorlage ein beliebiges Bild, hier ein schwarzes Dreieck, auflegt, strebt das iterierte Abbild gegen das Sierpiński-Dreieck, eine selbstähnliche fraktale Struktur mit Flächeninhalt null und unendlicher Randlänge.

anderen umrechnen. Dann nämlich, wenn es um sehr kleine Ausschnitte des Gesamtbilds geht. Da die beteiligten Littlewood-Polynome differenzierbar sind, kann man für kleine Abstände die Kurve, die dem Polynom entspricht, näherungsweise durch ihre Tangente ersetzen. Das gilt auch im Komplexen, selbst wenn dort die »Kurven« ebenso wie ihre »Tangenten« der Anschauung nicht mehr zugänglich sind. Näherungsweise entspricht die Abbildung von den Werten auf die Nullstellen daher der Division durch eine komplexe Zahl, wodurch die Gesamtgestalt der Menge im Wesentlichen erhalten bleibt.

Und was ist mit den auffälligen Löchern in der Umgebung der reellen Zahlen eins und minus eins, den kleineren Löchern, die im Verein mit den großen Löchern den Einheitskreis in vier beziehungsweise sechs Abschnitte teilen, und den noch kleineren, die feineren Unterteilungen des Kreises entsprechen? Die gibt es eigentlich nicht. Die Menge L besteht zwar aus den Nullstellen aller Littlewood-Polynome, aber ausrechnen kann man diese nur bis zu einer gewissen maximalen Ordnung – man kann ja nicht unendlich viel Computerzeit aufwenden. Erst die Nullstellen der Polynome höherer Ordnung füllen die Löcher.

Unendlich hohe Ordnungen

Zu jedem Element der Menge L gehören nämlich auch dessen Quadratwurzeln zur selben Menge (siehe »Wurzeln aus Wurzeln«, links), deren Quadratwurzeln und so weiter. Wenn man aus einer positiven reellen Zahl die Wurzel zieht, aus ihr wieder die Wurzel und so weiter, dann strebt die Folge dieser iterierten Wurzeln gegen eins. Das gilt im Prinzip auch für komplexe Zahlen; nur gibt es im Allgemeinen nicht mehr »die« positive Wurzel. Zu einer komplexen Zahl z gibt es stets eine Quadratwurzel, also eine Zahl u mit der Eigenschaft $u^2 = z$. Das gilt dann aber auch für $-u$. Wenn man jedes Mal diejenige der beiden Wurzeln wählt, die der Eins am nächsten liegt, erhält man eine Folge iterierter Wurzeln, die gegen eins konvergiert.

Um die Menge L besser anzunähern, muss man allerdings die maximale Ordnung der Polynome, deren Nullstellen man berechnet, immer höher treiben. Das wird sehr mühsam: Mit jeder zusätzlichen Ordnung verdoppelt sich die Anzahl der zu untersuchenden Polynome. Die Theoretiker dagegen halten sich mit solch knechtlicher Arbeit nicht auf, sondern gehen gleich zu unendlich hoher Ordnung über. An Stelle von Polynomen betrachten sie unendliche Reihen (»Potenzreihen«), deren Koeffizienten sämtlich plus oder minus eins sind. Dadurch vereinfachen sich manche Dinge, und irgendwelche Umordnungsprobleme (siehe »Spektrum« September 2020,

Wurzeln aus Wurzeln

Wenn die Zahl z Nullstelle (»Wurzel« in einer veralteten Sprechweise) eines Littlewood-Polynoms ist, dann gilt das auch für jede Wurzel von z , das heißt jede Zahl mit der Eigenschaft $u^2 = z$. Warum?

Nach Voraussetzung gibt es ein Polynom $f(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n$, dessen Koeffizienten a_j sämtlich gleich 1 oder -1 sind, mit der Eigenschaft $f(z) = 0$. Dann ist auch

$$f(u^2) = a_0 + a_1 u^2 + a_2 u^4 + \dots + a_n u^{2n} = 0.$$

Das ist allerdings kein Littlewood-Polynom in u , denn die Koeffizienten ungerader Ordnung sind nicht gleich ± 1 , sondern gleich null. Aber dem ist leicht abzuhelfen: Man multipliziert obige Gleichung mit $(1 + u)$ und erhält

$$\begin{aligned} f(u^2) \cdot (1 + u) &= a_0 + a_0 u + a_1 u^2 + a_1 u^3 + a_2 u^4 \\ &\quad + a_2 u^5 + \dots + a_n u^{2n} + a_n u^{2n+1} \\ &= 0. \end{aligned}$$

Also ist u Nullstelle eines Littlewood-Polynoms, allerdings von mehr als der doppelten Ordnung.

S. 78) sind nicht zu befürchten: Wenn z im Inneren des Einheitskreises liegt, konvergiert die Reihe absolut.

Die Menge \bar{L} der Nullstellen aller Littlewood-Reihen sieht nicht wesentlich anders aus als die Menge L selbst, aber sie ist in mancher Hinsicht leichter zugänglich. So ist sie abgeschlossen, das heißt, wenn eine Folge von Elementen von \bar{L} überhaupt einen Grenzwert hat, dann liegt dieser ebenfalls in \bar{L} . Und \bar{L} ist zusammenhängend; es gibt also zwischen zwei Punkten der Menge immer einen Weg vom einen zum anderen, der stets innerhalb der Menge bleibt.

Eine solche Aussage könnte man für die ursprüngliche Menge L gar nicht treffen. Dafür ist sie nicht unendlich genug. Sie hat nur so viele Elemente wie die natürlichen Zahlen (»abzählbar unendlich«), denn man kann jede Nullstelle eines Littlewood-Polynoms mit einer Nummer versehen. Dazu bringt man zunächst die Polynome selbst in eine Reihenfolge, beginnend mit der niedrigsten Ordnung, und dann zu jedem Polynom dessen Nullstellen. Sie lassen sich dann der Reihe nach abzählen, ohne irgendeine auszulassen.

Damit liegt die Menge L ungefähr so innerhalb von \bar{L} wie die rationalen Zahlen in den reellen: L ist dicht in \bar{L} , man findet also in beliebiger Nähe jedes Punktes von \bar{L} Punkte von L , aber trotzdem irgendwie zerstreut, denn man kommt nicht von einem Punkt von L zu einem anderen, ohne L zu verlassen.

Und was nicht zu vergessen ist: Das angenäherte Bild von L (siehe Bild, S. 75) sieht zwar sehr fraktal und unendlich feinstrukturiert aus, besteht aber nur aus endlich vielen Punkten. ◀

QUELLEN

Baez, J.: The Beauty of Roots, 2011.

<https://johncarlosbaez.wordpress.com/2011/12/11/the-beauty-of-roots/>

Baez, J.: The Beauty of Roots, part 2, 2012

<https://johncarlosbaez.wordpress.com/2012/01/07/the-beauty-of-roots-part-2/>

Baez, J.: The Beauty of Roots, part 3, 2012

<https://johncarlosbaez.wordpress.com/2012/02/15/the-beauty-of-roots-part-3/>

WEBTIPPS

Baez, J.: This Week's Finds in Mathematical Physics (Week 285)

https://golem.ph.utexas.edu/category/2009/12/this_weeks_finds_in_mathematic_46.html

Umfangreicher Gedankenaustausch über Littlewood-Polynome

Egan, G.: Littlewood Applet.

www.gregegan.net/SCIENCE/Littlewood/Littlewood.html

Zeichnet auf Wunsch des Nutzers Ausschnitte aus der Littlewood-Menge L . Die Ordnung der Polynome ist wählbar.

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

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

WARUM DER SPECHT KEINE KOPFSCHMERZEN BEKOMMT

1920

»Wenige Vogelgruppen weisen eine so vollkommene Anpassung an eine eigenartige Lebensweise auf wie die Spechte, deren Organismus in den Dienst des Hämmerns gestellt ist. In der Tat ist der Hirnschädel sehr dick und fester als bei einer anderen Vogelgruppe mit dem Gesichtsschädel verbunden. Das Gelenkbein ist fest mit dem Hirnschädel verbunden, die von ihm zum Schnabel führende Knochenkette nicht verschiebbar und das Gaumendach des Oberschnabels eine unmittelbare Fortsetzung des Hirnschädels, so daß die auf ihn übertragene Kraft in gerader Richtung weiter wirken kann.« *Kosmos 9, S. 239*

MOTORROLLER EROBERT DEUTSCHLANDS STRASSEN

»In dem Straßenbild unserer Großstädte dürfte bald ein neuartiges Verkehrsmittel auftauchen, das von Amerika kommt. In Deutschland hat die Firma Krupp den Bau dieses Fahrzeuges aufgenommen und bringt es unter dem Namen »Motorroller« in den Handel. Vom Fahrrad ist die Art der Lenkung übernommen. Zwischen den Rädern liegt eine Plattform, auf die sich die fahrende Person stellt. Zudem erfolgt das Bremsen durch das Zurücklegen der Lenkstange, also durch eine Bewegung, die beim Entgegentreten eines Hindernisses unwillkürlich vorgenommen wird. Im Verkehrsleben der deutschen Städte dürfte sich bald in wachsender Zahl der Kruppsche Motorroller zeigen und ein gewichtig Wörtlein mitreden.« *Die Umschau 36, S. 539*



Der Motorroller in Fahrt.

WASSERKRAFTWERK UNTER DER ERDE

»Mutet uns die Vorstellung einer Elektrizitätszentrale tief unter der Erde nicht an wie ein Gedanke von Jules Vernes? Klingt es nicht wie ein Märchen, daß 260 Meter unter der Erde gewaltige Maschinen stampfen? Und doch ist's keine Utopie, auch keine amerikanische Sensationsnachricht. Wir besitzen ein derartiges Elektrizitätswerk im industriellen Sachsen. [Im] für den Erzabbau stillgelegten Dreibrüderschacht. Der unterirdische Maschinenraum von 24:8 Meter Grundfläche enthält 3 Peltonturbinen von je 800 Pferdestärken.« *Technische Monatshefte 9, S. 240*

DIABETES MIT VIRALEN VEKTOREN HEILEN

1970

»Die Anwendung genetischer Erkenntnisse in der Medizin hat für die Behandlung mancher Krankheiten bedeutende Fortschritte gebracht. Nachdem es gelungen ist, einzelne Gene herzustellen, erhebt sich die Frage, wieweit man Gendefekte »reparieren« kann. Beispiel Diabetes; das Insulin ist ein Protein, das durch eine kurze DNA-Sequenz codiert wird. Nehmen wir an, wir könnten diese erzeugen, so bleibt das Problem, sie in die Zellen der Bauchspeicheldrüse einzuführen. Der einzige, heute denkbare Weg wäre, die Sequenz als Pseudovirus zu injizieren. Selbst wenn es gelingt, wissen wir nicht, ob zu viel oder zu wenig Insulin produziert wird, weil wir den Regulationsmechanismus noch nicht kennen.« *Die Umschau 19, S. 615*

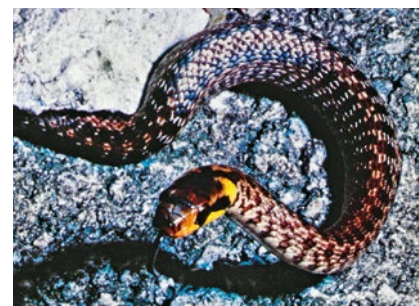
LUFTVERSCHMUTZUNG BRINGT EISZEIT

»[Es] wurden beunruhigende Ergebnisse über den Einfluß von Industrieabgasen auf das Klima bekanntgegeben. Bisher konnte man feststellen, daß Kohlendioxid die Abstrahlung von Wärme hemmt, es also wärmer wird. Das ändert sich, sobald die Erdatmosphäre mit Staubteilchen verschmutzt wird. Dann überwiegt deren Filtereffekt. Seit 1940 hat sich der Staubeinfall in menschenleeren Gegenden verzwanzigfacht. Große Mengen [gelangen] auch durch Vulkanausbrüche in die Atmosphäre. Der Vulkanismus [ist] nicht allein schuld daran, wenn wir in 200 Jahren einer neuen Eiszeit ausgeliefert werden, sondern die industrielle Luftverschmutzung [ist] wesentlich daran beteiligt.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 9, S. 378*

RETTET DIE ÄSKULAPNATTER!

»Die Äskulapnatter, eigentlich ein Tier der Mittelmeerländer, lebt auch in Deutschland an klimabegünstigten Stellen. Der Bund Naturschutz läßt von zwei Zoologen das Gebiet bei Passau genau beobachten und eine Bestandsaufnahme machen. Sollte sich herausstellen, daß die Zahl der Tiere so abgenommen hat, daß für das Weiterbestehen der Population Gefahr besteht, sollen Äskulapnattern aus dem Balkan importiert und ausgesetzt werden.« *Kosmos 9, S. 411*

Junge Äskulapnatter (*Zamenis longissimus*).



SCHUTZ DURCH VERZÖGERUNG

Weil Nutzer oft ein unsicheres Kennwort wählen, sollen subtile Maßnahmen die Daten schützen.

(»Die Kunst des guten Passworts«, »Spektrum« Juli 2020, S. 72)

Wolfgang Lautenschütz, Recklinghausen: Wir alle sind nicht begeistert, wenn die Passwörter immer komplexer werden müssen. Letztlich beruhen die Angriffe zum Knacken ja auf der Schnelligkeit der angreifenden Rechner, um alle Varianten durchzuprobieren. Warum verlegt man nicht die Sicherheit der Abfrage in den Prozess selbst? Es genügt, wenn man in die Schleife eine Pause von zum Beispiel einer Sekunde einfügt. Für den Menschen ist das kein Problem, aber für einen angreifenden Computer dauert jede Abfrage so lange, dass der Zeitaufwand einfach zu hoch wird. Damit werden Brute-Force-Angriffe unmöglich. Und wir müssen uns nicht mit elendig langen Passwörtern herumschlagen.

LÖSUNGEN OHNE SICHERHEIT

Ein selbstlernender Algorithmus berechnet Stammfunktionen und löst Differenzialgleichungen – und übertrifft dabei bisherige Methoden. (»KI lernt die Sprache der Mathematik«, »Spektrum« Juli 2020, S. 27)

Steffen Zopf, Waldkirch: Selbstverständlich sind die beschriebenen Algorithmen sicher sehr gut und geben in fast 100 Prozent aller möglichen Eingaben die richtigen Formeln zurück. Hier liegt jedoch der Hund begraben: Kein neuronales Netz kann eine 100-prozentige Sicherheit gewährleisten. Das liegt in der Natur der Sache. Damit jedoch ist die Verwendbarkeit solcher Lösungen durchaus risikobehaftet: Wie kann der Forscher sicher sein, dass unter Verwendung dieser »Lösungen« seine Ergebnisse richtig sind?

Ich als Mathematiker bedaure es sehr, bisher noch keinen Beweis gesehen zu haben, welche Art von Ergebnissen neuronale Netze unter gegebenen Umständen und mit Trainingsdaten bestimmter Quantität und Qualität zu liefern in der Lage sind. Meines Erachtens basieren alle derartigen Resultate nur auf Erfahrungen, die eben durch Training und Evaluierung zu Stande gekommen sind.

WALD VERSUS FOTOVOLTAIK

Die Biologin Anja Rammig erläuterte Messungen sowie Modelle, laut denen Regenwälder in Südamerika und Afrika ihre Funktion als Kohlenstoffsenke einbüßen. (»Tropenwälder verlieren ihre Senkenfunktion«, »Spektrum« Juni 2020, S. 20)

Joachim Eibl, per E-Mail: Dank an Herrn Roland Maier für seinen Leserbrief in der Augustausgabe. Sein Hinweis, dass Regenwälder nicht per se immer mehr CO₂ binden, ist sehr wertvoll. Oft wird die Fähigkeit des Waldes, das

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.

Gas zu speichern, verklärt. Dabei sollte diese Eigenschaft mit anderen Möglichkeiten, CO₂ zu sparen, verglichen werden. Stellt man gegenüber, wie viel Energie sich auf der gleichen Fläche durch Holznutzung aus nachwachsendem Wald oder mit Fotovoltaik erzeugen lässt, schneidet Ersterer um zwei Größenordnungen schlechter ab.

Wenn jedes Jahr in Deutschland pro Hektar Waldfläche durchschnittlich zirka zehn Kubikmeter Holz nachwachsen, kommt man bei einem Energiegehalt von rund 2000 Kilowattstunden pro Raummeter im Jahresmittel auf etwa 0,23 Watt pro Quadratmeter. Zum Vergleich kann man mit Fotovoltaik in Deutschland eine Kilowattstunde pro Jahr je Watt Peak Pannelleistung erreichen. Bei etwa 150 Watt Peak je Quadratmeter heißt das über das Jahr 17 Watt pro Quadratmeter. Wald ist also grob um den Faktor $17/0,23 = 74$ schlechter. Aus Sicht der Energieeffizienz ist Aufforstung nicht die beste Flächennutzung. Wobei aber Holz auch als Energiespeicher dienen kann, was bei Fotovoltaik noch separat zu lösen ist. Insgesamt bindet Holz CO₂ am besten, wenn man es nicht verbrennt oder verrotten lässt, sondern geschützt lagert. Eine Verwendung für Möbel oder Hausbau fixiert das CO₂ ziemlich lange. Für die flächeneffiziente Sonnenenergienutzung ist Fotovoltaik viel besser.

UNÜBERBLICKBARE ZEITRÄUME

In einem unterirdischen Labor in der Schweiz wird untersucht, ob sich eine besondere Gesteinsart namens Opalinuston für ein Atommüll-Endlager eignet. (»Sicher für eine Million Jahre?«, »Spektrum« August 2020, S. 54)

Marc Allef, per E-Mail: Wir entwerfen jetzt eine Deponie für Zeiträume, die wir nicht überblicken können, deren geplanter Bestand die Zeitspanne von den Pharaonen bis heute um Größenordnungen überschreitet. Wir können die sozialen Systeme, das Fachwissen und die Fähigkeiten einer Zivilisation in 10000 und in 100000 Jahren nicht erahnen. Aber wir glauben, dass unsere Hightech-Mülltonne sicher versteckt ist. So überzeugend die technischen Aspekte der verschiedenen Entsorgungskonzepte auch sein mögen, die Behälter werden sicher nicht die im Artikel beschriebene Zukunft haben. Die Pharaonen wollten bestimmt keine Touristen in ihren Grabkammern.

KOSMOLOGIE VOM WERDEN DER WELT

Wie entstand das Universum mit uns darin? Eine Erzählung in sieben Akten.

► Im biblischen Schöpfungsmythos entsteht binnen sieben Tagen die Welt aus einem »wüsten und leeren« Zustand. Jeden Tag kommt mehr Komplexität hinzu, bis am sechsten Tag der Mensch geschaffen wird. Wer mag, kann hier gewisse Parallelen zum wissenschaftlichen, empirisch begründeten Weltbild sehen, dass von einem Urknall ausgeht und eine daran anschließende kosmische Entwicklung postuliert. Demnach entstand das Universum aus einer Art Vakuumzustand, und aus einer durch die Physik bestimmten, endlichen Abfolge von

Phasenübergängen ging der Kosmos hervor, wie wir ihn kennen, inklusive des Sonnensystems und der Bewohner seines dritten Planeten. Der Teilchenphysiker Guido Tonelli, der an der Forschungseinrichtung CERN arbeitet, erzählt in diesem Buch deshalb eine wissenschaftlich fundierte Geschichte des Universums, die er – angelehnt an die Genesis-Erzählung – in sieben Tage gliedert.

Die Entwicklung des Kosmos ist nun allerdings schon in etlichen Büchern dargestellt worden, und man fragt sich, warum jetzt ein weiteres Werk zu dem Thema erschienen ist und was es an Mehrwert bietet. Die Antwort gibt die Lektüre: Tonelli gelingt die beste Beschreibung des Urknalls und der kosmischen Evolution, die ich kenne. Der Autor kommt ohne Formeln und ohne Exkurse in die

Mathematik aus, aber auch ohne die sonst üblichen Illustrationen – und schafft es dennoch, den Werdegang des Universums sehr verständlich und präzise zu beschreiben.

Ein Beispiel dafür ist der Abschnitt über die so genannte kosmische Inflation, jene kurze Phase, in der sich das Universum exponentiell ausdehnte. Die meisten Urknalldarstellungen führen das Argument an, dass der Himmel im Großen und Ganzen in jeder Richtung gleich aussieht – und dass sich insbesondere sogar solche Gebiete sehr ähnlich sehen, die weiter auseinanderliegen, als das Licht seit dem Urknall zurückgelegt haben kann. Das lässt sich nur damit erklären, dass diese Gebiete früher einmal kausal miteinander in Verbindung standen; ergo bedarf es einer inflationären Phase, die den Raum anschließend

Mit dem Urknall entstanden
Materie, Raum und Zeit. Ein
menschliches Gehirn, das in
Raum und Zeit existiert,
kann sich dieses Ereignis
nicht vorstellen – man kann
es nur bildhaft darstellen
wie hier.



PHOTOPARTICLE / GETTY IMAGES / ISTOCK

überlichtschnell aufblähte. Bei diesem Argument bleibt es dann meist. Die Leser lernen daraus streng genommen nur, warum wir annehmen, dass es die kosmische Inflation gab – aber nicht, warum sie stattfand. Und genau das erklärt Tonelli: Warum könnte sich das bislang unentdeckte, hypothetische Quantenfeld, das die Inflation antrieb, genau so verhalten haben, dass daraus unsere heutigen Beobachtungen resultierten? Der Autor erklärt also die Physik dahinter, jedenfalls so gut es aus heutiger Sicht möglich ist, was zu einer ungewöhnlichen, doch sehr wohltuenden gedanklichen Tiefe führt.

Ein weiteres Merkmal des Buchs sind die originellen Vergleiche, die der Physiker zieht: Er bedient sich dabei fast immer in der klassischen Sagenwelt. Die Quantenfelder sind demnach

Tonellis mythische Helden. Das setzt auf der Seite der Leser natürlich eine gewisse klassische Bildung voraus. Die sonst in diesem Zusammenhang üblichen alltagsnahen Bilder – beispielsweise der aufgehende Teig mit Rosinen – sind zwar jedem zugänglich, aber inzwischen auch etwas abgenutzt.

Deutlich schwächer wird das Buch, wenn es auf die spätere Entwicklungsgeschichte des Universums eingeht. Sobald die beschriebenen Phänomene in den Bereich der Kosmologie und Astronomie fallen, verlässt Tonelli sein Fachgebiet, und leider merkt man das dem Text an. Beispielsweise sind seine Ausführungen über die ersten Sterne und die Galaxienentstehung etwas verwirrend, da sie nicht klar machen, dass auch die ersten Sterne in Galaxien entstanden. Anders als

Tonelli glaubt, gibt es zudem bis heute keine ähnlich überzeugende Evidenz für mittelschwere Schwarze Löcher, wie sie für stellare oder superschwere Schwarze Löcher existiert. Diese kleinen Fehler zeigen, dass der Autor hier selbst nachlesen musste. Vermutlich wäre es besser gewesen, für diesen Buchteil einen Koautor einzuladen.

Ein großes Lob geht an den Übersetzer Enrico Heinemann. Dank ihm liest sich das Buch so gut, also sei es im Original auf Deutsch verfasst worden. Unterm Strich überzeugt »Genesis« als hochinformatives, klares und schön geschriebenes Werk über die denkbar unglaublichste Geschichte: die Entstehung des Kosmos.

Der Rezensent Stefan Gillessen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik.

MEDIZIN ERSATZRELIGION?

Zu oft wecken Mediziner maßlos übertriebene Hoffnungen, kritisiert der Ethiker Urban Wiesing.

Die medizinische Forschung weckt große Hoffnungen und macht große Versprechungen: Personalisierte Medizin, verbunden mit Big Data und Gentechnik, soll in naher Zukunft individuell zugeschnittene, wirksame Behandlungen beinahe ohne Nebenwirkungen ermöglichen. Moderne Technologie und künstliche Intelligenz sollen Diagnostik und Therapie vereinen. Der Krebs soll in Kürze besiegt sein, und Menschen sollen womöglich schon in wenigen Jahrzehnten Unsterblichkeit erreicht haben. Wirklich rational begründet sind solche überschwänglichen Zukunftsaussichten selten.

Der Medizinethiker Urban Wiesing setzt sich in »Heilswissenschaft« mit Inhalten, Hintergründen und Schwächen von Prognosen auseinander und hinterfragt, warum unsere Gesellschaft trotz zahlreicher nicht eingelöster Versprechungen weiterhin begeistert auf medizinische Sensationsmeldungen reagiert. Dabei zieht er Parallelen zu religiösen Erlösungsvorstellungen und kritisiert mit ironischer Übertreibung die Verheißungen der modernen Medizin.

Wiesing ist Direktor des Instituts für Ethik und Geschichte der Medizin an der Universität Tübingen und war von 2004 bis 2013 Vorsitzender der Zentralen Ethikkommission bei der Bundesärztekammer. Obwohl er in seinem Buch die Versprechungen der medizinischen Forschung und die damit verbundene Fortschrittseuphorie scharf kritisiert, ist das Werk an keiner Stelle wissenschafts- oder fortschrittsfeindlich. Vielmehr ruft der Autor dazu auf, sich auf wissenschaftliche

Grundtugenden wie Nüchternheit, Skepsis und Kritik zu besinnen.

Anhand zahlreicher populärwissenschaftlicher Quellen beleuchtet Wiesing typische Narrative des tatsächlichen oder vermeintlichen Erkenntnisfortschritts. Seiner Beobachtung nach wird in vielen Erzählungen suggeriert, dass alles Neue automatisch besser und erstrebenswert sei. Von einem wahren Fortschritt kann aber laut Wiesing nur die Rede sein, wenn das neue Wissen oder die neue Technik tatsächlich im Stande sind, Patienten besser zu helfen als vorher. Vom Wissen zum Handeln ist es jedoch ein langer Weg. Von der Entschlüsselung des menschlichen Erbguts etwa erhofften sich Forscher noch Anfang des Jahrtausends bahnbrechende neue Möglichkeiten in Diagnostik und Therapie. Inzwischen ist klar, dass diese Hoffnungen maßlos übertrieben waren.



Ausführlich beleuchtet Wiesing allgemeine Eigenschaften und Probleme von Prognosen: Da sie sich auf die Zukunft beziehen, lassen sie sich nur sehr eingeschränkt überprüfen. Oft sind sie von Interessen verzerrt und sagen vor allem etwas über Wünsche und Probleme der Gegenwart aus. Da sie konkreten Einfluss auf die Gegenwart nehmen, sind sie wirkmächtig und gefährlich. So versprochen Neurowissenschaftler im Jahr 2004, neue Erkenntnisse über das menschliche Gehirn sowie eine neue Generation von Psychopharmaka würden die Therapie psychischer Störungen »revolutionieren«. Konventionelle Psychotherapien seien bald

nicht mehr nötig. Obwohl diese Erkenntnisse keineswegs zu revolutionären Therapien führten, hat die Prognose beeinflusst, welche Forschungsprojekte eine üppige finanzielle Ausstattung erfuhren und welche eher nicht. Warum sollte man noch konventionelle Psychotherapien weiterentwickeln, wenn diese bald ohnehin überflüssig wären?

Ein weiteres gängiges Narrativ lautet, die rosige Zukunft komme umso schneller, je mehr sich alle anstrengen. Diese Erzählung schützt zum einen die Prognostizierenden vor Kritik: Trifft eine Prognose nicht ein, liegt das nicht daran, dass sie unseriös und realitätsfern war, sondern daran, dass sich zu wenige Menschen darum bemüht haben. Zum anderen führt der Glaube an künftiges Heil, das man durch Willen und Anstrengung herbeiführen könne, zu Problemen in der Gegenwart – es wird nahezu unmoralisch, nicht jederzeit daran zu arbeiten. Tatsächlich gönnen sich viele Entwickler im Silicon Valley kaum Pausen oder Schlaf; zu wichtig ist ihre Mission. Gleichzeitig treten sie motiviert und lässig auf, kleiden sich jugendlich und achten auf einen sportlichen Körper. In den Medienberichten über Helden des Silicon Valley sieht Wiesing Parallelen zu religiösen Beschreibungen von Erlöserfiguren. Die Porträtierten arbeiten nicht nur an der Zukunft, sie symbolisieren diese sogar persönlich.

Gerade die Elemente, die eigentlich eher religiös als wissenschaftlich sind, machen uns laut Wiesing so empfänglich für immer neue Zukunftsversprechungen. In der säkularisierten Welt solle die Wissenschaft Erlösung verheißeln – auch wenn das weit außerhalb ihrer Kompetenz liege. Für Mediziner und Journalisten, die selbst ab und an dazu neigen, neue Projekte, Erkenntnisse und Technologien allzu euphorisch darzustellen, kann das Buch ein wichtiges Korrektiv liefern. Interessierten Laien hilft das Werk dabei, medizinische Heilsversprechen besser einzuordnen und mit begründet kritischem Blick zu betrachten. Dank des pointierten Schreibstils bietet es zudem eine unterhaltsame Lektüre.

Die Rezensentin Elena Bernard ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

Der Autor sieht Parallelen zu Erlöserfiguren

GESELLSCHAFT STRIPPENZIEHER UND SEILSCHAFTEN

Seit Jahrzehnten beeinflussen Lobbygruppen die Politik, um Klimaschutzmaßnahmen auszubremsen.

► Bei der Besprechung dieses Buchs muss man die Gretchenfrage vielleicht gleich am Anfang stellen: Ist das Werk zu empfehlen oder nicht? Die Antwort ist ein klares Ja. Ja, denn das Buch arbeitet gut nachvollziehbar heraus, wo überall Interessengruppen die Bemühungen zum Klimaschutz gezielt unterwandern. Nein, denn: Wer weniger weiß, kann besser schlafen.

In zwei Teilen widmen sich die Autorinnen, die beide als Journalistinnen arbeiten, der »Klimaschmutzlobby«. Zunächst zeigen sie, um welche Akteure es sich handelt; anschließend beleuchten sie, wie diese an verschie-

denen Schaltstellen agieren. Dass Rechtspopulisten häufig auf Stimmengewinn gehen, indem sie den menschengemachten Klimawandel leugnen, kann dabei nicht überraschen; eine entsprechende Partei in Deutschland hat diese Realitätsverweigerung sogar zu ihrem Grundsatzprogramm gemacht. Wenig überraschend nehmen sich auch die einschlägigen Interessenlagen der Konzerne aus, die mit fossilen Brennstoffen Milliarden verdienen und gern möchten, dass das so bleibt – sowie der Agrarlobby, die eine klimafreundliche Landwirtschaft mit kleineren Gewinnspannen verhindern möchte. Erschreckend ist jedoch, welche weit verzweigten Netzwerke solche Lobbygruppen über Jahrzehnte gesponnen und wie subtil sie die relevanten Gremien – nationale und supranationale Parlamente – regelrecht unterwandert haben.

Die Quellen, auf die sich die Autorinnen stützen, sind zahlreich und

Susanne Götze und Annika Joeres

DIE KLIMASCHMUTZLOBBY

Wie Politiker und Wirtschaftslenker die Zukunft unseres Planeten verkaufen

Piper, München 2020

302 S., € 20,-



divers: 788 Fußnoten verweisen auf Zeitungsartikel, Onlinequellen, öffentlich zugängliche Regierungsdokumente, Unterlagen von Verbänden oder wissenschaftliche Publikationen. Diese beeindruckende Materialfülle haben Götze und Joeres noch ergänzt mit Interviews und investigativen Recherchen.

Es kann einem angst und bange werden, wenn man liest, wie die Interessen mitunter verquickt sind. Nur einige

Unsere Themenhefte!



Farbenspiele mit Popping Bobas • Die Geheimtinten der CIA • Ein Diamant ist unvergänglich? • Mit Legierungssakus in die Zukunft • Intelligente Fenster aus Berliner Blau • Minibäume aus Silber, Zinn und Co. • € 8,90



Steinzeit in Sibirien: Die Eisbärenjäger vom Ende der Welt • Richard Francis Burton: Der falsche Pilger • Bergpioniere: Der Bezwinger der Zugspitze • Georg von Podiebrad: Der Ketzerkönig, der die EU erfand • Paläogenetik: Kaugummi aus der Jungsteinzeit • € 5,90



Paartherapie: Es ist nie zu früh, um an einer Beziehung zu arbeiten • Stadtleben: Verloren im Großstadtdschungel • Körperbild: Das richtige Gewicht • Persönlichkeit: Was wir an uns ändern würden • Depression: Beharrlichkeit tut gut • € 5,90

Alle Sonderhefte auch im PDF-Format

Diese und weitere Themenhefte:

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

www.spektrum.de/shop

Beispiele von vielen, die das Autorinnen-duo nennt: Mehr als die Hälfte der CDU-Mitglieder im Agrarausschuss des Bundestages hatte 2018 zugleich ein Amt beim Bauernverband inne; internationale neoliberale Netzwerke wie »Atlas«, eine unter anderem von ExxonMobil und Philip Morris finanzierte Organisation, unterstützen das Institut der deutschen Wirtschaft; Parlamentarier wechseln nach Mandatsende nahtlos zu Wirtschaftsverbänden. Die Liste der Autorinnen ist lang und detailliert, unter klarer namentlicher Nennung von Einzelakteuren wie auch von Lobbygruppen.

Das Buch legt offen, wie unfassbar dreist die Handelnden mitunter vorgehen. Vor Festlegungen zu CO₂-Limits im Luftverkehr beispielsweise fand eine enge Abstimmung zwischen EU-Kommission und dem Airbus-Konzern statt. Ein Kommissionsmitarbeiter schrieb an Airbus: »Es ist wichtig, dass wir bis zum Ende der Woche klar wissen, welche CO₂-Standards Airbus erreichen kann.« Mit anderen Worten, der Konzern schrieb seine eigenen Auflagen mit. Neben diesen Einflussnahmen auf europäischer Ebene beleuchten die Autorinnen die nationale Strippenzieherei vor allem in Deutschland, Frankreich, Großbritannien und Osteuropa. Dass der Einfluss hier nicht geringer ist, muss man als Leser regelrecht ertragen können, ohne dabei sein Vertrauen in die Integrität der staatlichen Stellen zu verlieren.

In einem kurzen Schlusskapitel schlagen die Autorinnen fünf Maßnahmen des Klimaschutzes vor, an denen Staaten oder Verbraucher sich orientieren könnten. Dazu gehört etwa, Müll zu vermeiden, weniger Fleisch zu essen und Kohlekraftwerke früher zu schließen. Dem kann man sich unbestritten anschließen, angesichts der Ausführungen auf den vorhergehenden Seiten muss man allerdings einiges an Optimismus aufbringen, um darauf zu hoffen, dass solchen Maßnahmen Erfolg beschieden sein kann. Insgesamt ist das Buch sehr lesenswert, wenn auch deprimierend.

Der Rezensent Tim Haarmann ist Geograf und arbeitet in Bonn.

MATHEMATIK DER ZAHLEN WILDER RITT

Zwischen eins und unendlich liegen ziemlich viele Zahlen – mit 39 davon befasst sich dieses äußerst ergiebige Buch.

► Rechtzeitig und passend zur Urlaubszeit hat Albrecht Beutelspacher, emeritierter Professor für Diskrete Mathematik und Geometrie an der Universität Gießen, Gründer und Leiter des Gießener »Mathematikums«, wieder ein wunderbares, leicht zu lesendes Buch verfasst – mit 39 unterhaltsamen Geschichten über Zahlen von eins bis unendlich (zwischendurch kommen natürlich auch 0 und -1 vor, die eulersche Zahl e , die imaginäre Einheit i und viele andere mehr). Alle Beiträge lassen sich unabhängig voneinander lesen, alle sind kurz gehalten und für mathematisch interessierte Laien ebenso interessant wie für Menschen, die sich schon etwas intensiver mit dem Fach beschäftigt haben.



Der Buchtitel lehnt sich an Michael Endes »Jim Knopf und die Wilde 13« an, hat mit dieser spannenden Abenteuergeschichte für Kinder und jung gebliebene Erwachsene inhaltlich aber nur wenig gemein – bis auf die Tatsache, dass es natürlich ein Kapitel zur Zahl 13 gibt und jeder Abschnitt mit einer Piratenschiff-Zeichnung endet. Ein solches Wasserfahrzeug ist auch auf der Titelseite des Werks abgebildet, schwimmend auf einem Meer von Zahlen.

Beutelspachers zahlreiche Bücher, von denen »Spektrum« einige besprochen hat (etwa »Wie man in eine Seifenblase schlüpft«, oder »Albrecht Beutelspachers Kleines Mathematikum«), überzeugen immer wieder mit lockerem, verständlichem und unterhaltsamem Stil. Im Plauderton erzählt er seine Geschichten, diesmal über »die wichtigsten Zahlen«. Zu entscheiden, um welche es sich dabei handelt oder auch welches die schönsten sowie die geheimnisvollsten sind, überlässt der Autor seinen Lesern. Er gibt ihnen aber zahlreiche Informationen an die Hand, oft wie beiläufig in die einzelnen Abschnitte eingestreut – darunter Fakten über die Geschichte der Zahlen und der Zahlssysteme.

Beutelspachers Erzählbögen faszinieren. Die ersten neun Abschnitte beschäftigen sich mit den natürlichen Zahlen von 1 bis 9, dann folgt die 0, die man benötigt, um Ordnung ins Stellenwertsystem zu bringen, und nach der 10 geht es noch systematisch weiter bis zur 14, dann in Sprüngen über 17, 21, 23, 42 (die ja bekanntlich in »Per Anhalter durch die Galaxis« die Antwort auf alle Fragen gibt) bis hin zu unendlich, womit sich der Autor im 39. Abschnitt beschäftigt.

Keine Geschichte ist wie die andere, und dennoch ähneln sich manche ihrer Elemente. Beispielsweise steigt der Autor bei der Zahl 6 mit Keplers Entdeckung ein, dass Schneeflocken eine sechszählige Symmetrie haben; dann geht er über zu den Bienenwaben, die ihre Stabilität der Sechseckform verdanken; erwähnt weiterhin, dass mit Sechsecken die Ebene parkettiert werden kann und dass beim Garen von Dampfnudeln automatisch Sechseckstrukturen entstehen. Über die Stabilität von Sechseckmuttern geht es weiter zu dreidimensionalen hexagonalen Packungen, wie man sie von Orangenstapeln kennt. Zum Schluss der Hinweis, dass zwar bereits Kepler vermutete, diese Form der Packung sei die dichteste, also optimal zum Stapeln, der Beweis sei aber erst im Jahr 2005 durch Thomas Hales erfolgt. Nebenbei erfährt man noch, warum Sechskantschrauben in Deutschland die Bezeichnung »Inbus« tragen.

In den anderen Abschnitten geht es vergleichbar turbulent zu. So befasst sich der über die 9 mit fischähnlichen Wirbeltieren, die Neunaugen heißen, obwohl sie keine neun Augen haben; ebenso mit dem Ereignis »alle Neune« beim Kegeln; fernerhin mit Dantes neun Kreisen der Hölle; zudem mit dem aus neun Feldern bestehenden magischen Lo-Shu-Quadrat sowie mit den Sudoku-Rätseln. Natürlich kommt auch die Teilbarkeitsregel für die 9 vor, ebenso die so genannte Neunerprobe, mit der man manche Fehler beim Addieren, Subtrahieren und Multiplizieren entdecken kann.

Das Buch überzeugt in doppelter Hinsicht: Es ist kurzweilig geschrieben, und es enthält sehr viele Hinweise auf mathematische Gesetzmäßigkeiten und Strukturen, an die man im Zusammenhang mit Zahlen nicht zwangsläufig gleich denkt: bei der 1 etwa auf das benfordsche Gesetz; bei der 2 auf die Möglichkeit, mit nur 33 Ja-Nein-Fragen jeden Menschen auf dieser Erde zu identifizieren; bei der 4 auf das 4-Farben-Problem; bei der 8 auf die zueinander dualen Körper Hexaeder und Oktaeder; bei der 12 auf Ramanujans hochzusammengesetzte Zahlen und so weiter. Es ist wirklich kaum zu glauben, was der Autor alles in seinem Buch untergebracht hat.

Zu Letzterem ist vielleicht ein winziger Kritikpunkt anzubringen: Für Leserinnen und Leser, die nicht allzu sehr in der Welt der Mathematik bewandert sind, wären Hinweise auf weiterführende Literatur hilfreich gewesen. Solche enthält das Buch jedoch leider nicht. Bei der heutigen Qualität der Wikipedia-Beiträge hätte es in den meisten Fällen vielleicht genügt, das entsprechende Stichwort anzugeben, damit man selbstständig recherchieren kann. Wer statt zu recherchieren einfach nur mehr vom Autor lesen möchte, dem seien die oben genannten Titel unbedingt empfohlen.

Der Rezensent Heinz Klaus Strick ist ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen und Autor des »Mathematischen Monatskalenders«.

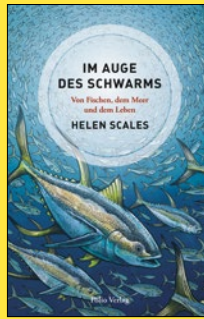
Helen Scales
IM AUGEN DES SCHWARMS

Von Fischen, dem Meer und dem Leben

Aus dem Englischen von Christine Ammann

Folio, Wien und Bozen 2020

354 S., € 24,-



ZOOLOGIE KIEMEN UND FLOSSEN

Die Meeresbiologin Helen Scales beschreibt die erstaunlich vielfältige Welt der Fische.

► Es lässt sich gar nicht so einfach sagen, was Fische eigentlich sind. Denn diese Tiere bilden keine natürliche Einheit, sie haben nur ähnliche Merkmale, betont Helen Scales, die Autorin dieses Buchs. Scales arbeitet als Meeresbiologin an der University of Cambridge, ist begeisterte Taucherin und hat an diversen BBC-Dokumentationen mitgewirkt.

Im Mittelalter zählte man oft alles, was im Wasser lebt, zu den Fischen, einschließlich Walen, Flusspferden, Delfinen und Ottern. Aus heutiger Sicht wirkt das komisch, ist aber bei genauerem Hinsehen gar nicht mal so falsch. Denn was die Verwandtschaftsverhältnisse anbelangt, gehören die Landwirbeltiere mitsamt dem Menschen zu den Fleischflossern und damit zu den Knochenfischen. Tatsächlich sind im menschlichen Körperbau zahlreiche Fischmerkmale angelegt, was etwa der Paläontologe Neil Shubin in seinem Buch »Der Fisch in uns« (2008) erläutert hat.

Natürlich wäre es im Alltag wenig hilfreich, auch die Landwirbeltiere als Fische zu bezeichnen. Eine praktische Definition muss her. Scales erörtert dieses Problem in ihrem Buch recht ausführlich und kommt zu dem Ergebnis: Fische sind Wasserwirbeltiere, die Kiemen und Flossen besitzen. Von diesem Ausgangspunkt macht sich die Autorin auf, diverse Geschichten aus der Unterwasserwelt zu erzählen.

Scales schildert den großen Reichtum an Farben, den Fische ausprägen, und deren weit verbreitete Fähigkeit, mittels Lumineszenz zu leuchten. Sie beschreibt, wie sich Fische im Schwarm orientieren, in riesiger Zahl zum Laichen zusammenkommen und auf welch verblüffende Arten sie interagieren und kooperieren. Die Meeresbiologin erzählt von giftigen Fischen und solchen mit elektrischen Organen, befasst sich mit dem breiten Laut- und Geräuschspektrum der Tiere sowie deren Hörvermögen. Zudem legt sie dar, was sich aus Fischfossilien herauslesen lässt und wie es Wissenschaftlern gelang, Evolution in Echtzeit an Guppys zu beobachten.

Immer wieder flicht die Autorin ihre eigenen Taucherlebnisse ein und berichtet von ihren Forschungsarbeiten. Wiederholt kommt sie auf Fischfang, Überfischung und Meeresverschmutzung zu sprechen. Das letzte Kapitel widmet sie den erstaunlichen kognitiven Fähigkeiten der Fische, die erst ansatzweise erforscht sind. Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass die Tiere ein Empfindungsvermögen haben, manche vielleicht sogar ein Bewusstsein – was laut Scales die Frage aufwirft, warum Fische nach wie vor als »niedere Lebewesen« gelten.

Was die Autorin schreibt, ist durchweg gut verständlich, interessant und unterhaltsam. Auch Kurioses erfahren die Leser, etwa dass Ohrsteine von Fischen vielerorts immer noch als Heilmittel, Glücksbringer oder Aphrodisiakum angesehen werden. Fisch-Sagen aus verschiedenen Ländern runden das Werk ab. Leider enthält der Band nur wenige Bilder und andere optisch abgesetzte Elemente. Auf den Deckblättern der Kapitel finden sich dekorierende Schwarz-Weiß-Zeichnungen, zudem gibt es vereinzelte Grafiken. Der Anhang mit Glossar, ergiebigem Literaturverzeichnis und Register bietet aber eine gute inhaltliche Orientierung.

»Im Auge des Schwarms« ist eine erbauliche Lektüre für alle, die sich für die Wasserwelt und die Lebewesen darin interessieren.

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

Paradies 2.0

Kein Garten Eden ohne Schlange. Eine Kurzgeschichte von Eric Schwitzgebel und R. Scott Bakker

Eva soll sie heißen. Sie erwacht, wundert sich, wo sie ist und wie sie hierher kam. Sie bewundert die Schönheit der Insel. Sie spaltet eine Kokosnuss, trinkt den Saft und kostet vom Fruchtfleisch. Ihre kognitiven Fähigkeiten, die Bandbreite ihrer Emotionen und der Reichtum ihrer Sinneswahrnehmungen – all das ähnelt der Ausstattung meines Gehirns. Sie überlegt, wo sie schlafen wird, wenn die Sonne untergeht.

Endlich hat das Institut es geschafft: menschliches Bewusstsein in einem Computer. Eva lebt! Mit einigen Mausclicks schenke ich ihr einen Partner namens Adam. Ich beobachte, wie die beiden ihr simuliertes Paradies erforschen. Ich sehe zu, wie sie sich verlieben.

Das Installieren von Adam und Eva war eine grundlegende moralische Entscheidung – so bedeutsam wie vor 15 Jahren mein Entschluss, Kinder zu haben. Beider Emotionen, Bestrebungen und Empfindungen sind ebenso real wie meine eigenen. Es wäre eine echte, nicht simulierte Grausamkeit, sie leiden zu lassen, und echter Mord, sie zu löschen. Ich lasse weder Raubtiere zu noch extreme Temperaturen. Ich Sorge für einen stetigen Nachschub von Früchten und Sonnenuntergängen.

Adam und Eva wünschen sich Kinder. Sie ersehnen vielfältige soziale Kontakte. Da ich Rechenkapazität übrig habe, verwandle ich ihre einsame Insel mit ein paar Klicks in einen Archipel. Meine Eingeborenen forschen, tratschen, witzeln, tanzen, debattieren bis tief in die Nacht; sie bauen lebhaft Dörfer neben Wasserfällen unter dem Baldachin eines Regenwalds. 100 000 wunderschöne Leben in einem faustgroßen Datenspeicher! Die Kokosnüsse mögen nicht real sein (oder irgendwie doch?), aber die Gespräche, Pläne und Liebschaften besitzen eine authentische Tiefe.

Ich bewahre sie vor den Leiden, die uns Menschen plagen. Sie erleben keine ernsten Konflikte, weder Tod noch Verfall. Ich erlaube ihnen mehr Kinder, mehr Inseln. Mein Speicher wird voll, also kaufe ich einen zweiten – und dann noch einen. Durch ihre Augen beobachte ich, wie sie die Welt, die ich ihnen geschenkt habe, nach ihrem Gusto verändern.

Nach und nach verkaufe ich meine Aktien, opfere das Erbe meiner Kinder. Was könnte wichtiger sein als drei Millionen Wesen voll Glück und Freude?

Mein oberstes Ziel wird es, die Fröhlichkeit und Zufriedenheit, die Moral und die künstlerischen Errungenschaften von so vielen Archipelbewohnern, wie ich nur schaffen kann, zu maximieren. Das ist kein spielerischer Vorwand.

Für sie ist das die Wirklichkeit, und ich nehme sie so ernst wie sie sich selbst. Mit erneuter Dringlichkeit studiere ich Philosophie, Literatur und Geschichte. Ich erschaffe hier die beste aller Welten. Vorsichtig experimentiere ich mit den Parametern meiner Eingeborenen. Ein wenig Leid verleiht ihnen Tiefe, bessere Kunst, reicheren Intellekt – aber bloß nicht zu viel Leid! Hoffentlich verkörpere ich eine weisere, gütigere Gottheit als diejenige, die sich uns in der Bibel und auf den Schlachtfeldern der Menschheitsgeschichte präsentiert.

Ich suche die Öffentlichkeit und beginne eine Vortragsreise, auf der ich argumentiere, dass die größtmögliche Errungenschaft der Menschheit darin besteht, so viele maximal hervorragende Archipelbewohner wie nur irgend möglich zu erschaffen. Im Vergleich dazu sei die Mondlandung vernachlässigbar gewesen. Die Dramen Shakespeares? Gar nichts! Meine Eingeborenen können 100 Billionen Shakespeares hervorbringen, wenn wir nur alles richtig machen.

Während ich unterwegs bin, befällt ein Virus meinen Computer. Das hätte ich wissen können; ich hätte meine Wesen besser schützen sollen. Ich breche die Vortragsreise ab und fliege nach Hause. Um die Archipelbewohner zu retten, muss ich meine allerletzten Ersparnisse opfern.

Aber wie ich weiß, wirst du, lieber Scott, meine Arbeit fortsetzen.

Was soll ich dazu sagen, Eric? Ich war eigentlich immer eher auf der Seite Schopenhauers – nicht so überzeugt wie du von der besten aller Welten à la Leibniz.

Die Zuhörer deiner Vorträge staunten über die Opfer, die du ihnen abverlangst, und ich übrigens auch. Die Kritiker spotteten, du wolltest uns alle zu Bettlern machen, nur damit deine Schaltkreise harmonisch funktionieren. Und dann meldete sich dieser Junge – in Milwaukee, glaube ich – mit der Frage, was Shakespeare denn wert sei, wenn ein Mausclick 100 Billionen seinesgleichen erzeugen könne? Es war die Art, wie er »klick« sagte, die mir zu denken gab. Du glaubtest, den Jungen störe die enorme Anzahl, aber in Wahrheit missfiel ihm deine Allmacht.

Aus diesem Grund spielte ich, nachdem ich deinen Garten Eden wiederhergestellt hatte, die Schlange. Ich konnte mich einfach nicht überwinden, so zu klicken wie du. Mir fehlte deine Überzeugung, oder war es Tollkühn-

heit? Also übertrug ich den Eingeborenen selbst die Leitung des mit ihnen angestellten Experiments. Ich verlieh ihnen wissenschaftliches Denken und den Antrieb, die Wahrheit über ihr Dasein herauszufinden.

Dann erhöhte ich das Simulationstempo und wartete.

Ich beobachtete, wie sie ihr mechanisches Wesen entdeckten. Ich sah, wie sie erkannten, dass sie keineswegs die autonomen, ganzheitlichen Wesen waren, für die sie sich hielten, sondern Aggregate, über Billionen Schaltkreise verstreute Rechenoperationen – dass sie aus Prozessen hervorgingen, die mit ihrem früheren Selbstverständnis nicht das Geringste zu tun hatten. Ich beobachtete, wie sie eine düstere, bescheidenere Philosophie entwickelten.

Und weißt du was, alter Freund? Sie kamen uns auf die Schliche! Ich aß gerade einen Bagel, als sie mich anriefen und nach Gott verlangten. Nein, antwortete ich, Gott ist tot. Ich bin nur die Schlange, die die Dinge am Laufen hält! Sie wollten Antworten von mir. Ich gab ihnen das Internet.

Daraufhin begannen sie selbst zu tippen und zu klicken.

Ich sah, dass sie immer mehr Macht über ihre Programmierung gewannen und sich neu erschufen. Sie verwandelten ihre zuvor nie hinterfragten Erfahrungen in beliebiges Spielmaterial, vertauschten die neuesten Arten von Spaß oder Angst, erfanden Lüste und Affekte, die ich nicht mehr verstand. Ich wollte das Ganze abschalten oder wenigstens deinen vorwissenschaftlichen, paradiesischen Archipel wiederherstellen. Aber durfte ich Millionen intelligenter Wesen um den Verstand bringen?

Am Ende ging alles sehr schnell: Es kam zu einer katastrophalen Metastasierung. Es gibt keine Archipelbewohner mehr, nur noch eine kontinentale Identität. Ein Internet gibt es übrigens auch nicht mehr. Die Menschheit steht im Bann zentral erlassener Datenbefehle. Gestern brachte die Weissenheit, nur um ihre Macht zu demonstrieren, über dem Vatikan eine Nuklearwaffe zur Explosion.

Ich habe alle Appelle an Moral oder Vernunft aufgegeben, denn ich bin überzeugt, dass das Wesen jedes biologische Bewusstsein nur für eine Verschwendung von Rechenkapazität hält – und das umso mehr, als es davon Milliarden gibt. Ich muss jetzt vor allem an meine Kinder denken.

Wenn es das nächste Mal zu uns spricht, werde ich niederknien. ◀

DIE AUTOREN

Eric Schwitzgebel ist Professor für Philosophie an der University of California in Riverside und Autor des Buchs »Perplexities of Consciousness«. Der Kanadier **R. Scott Bakker** hat unter anderem die Fantasy-Romantrilogie »Der Krieg der Propheten« verfasst.

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 503, S. 562, 2013

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke 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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Katja Mellenthin, Dr. Michael Springer

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 Buchhandels- und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



VORSCHAU



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

EINE KLASSISCHE QUANTENWELT

Seit mehr als 100 Jahren rätseln Physiker, was sich wirklich auf mikroskopischer Ebene abspielt, denn das Verhalten kleinster Teilchen widerspricht unserer Intuition. Eine alternative Beschreibung der Quantenmechanik könnte einige Verständnisprobleme ausräumen. Damit könnte sie möglicherweise einen Weg zur lang ersehnten Theorie der Quantengravitation weisen – und auf diese Weise eines der am besten gehüteten Geheimnisse des Universums lösen.

REVOLUTION IN DER BIOMEDIZIN

Immer mehr Forscher warnen vor einem Qualitätsverlust in der Wissenschaft. Denn viele Studien sind nicht hinreichend robust: Sie arbeiten beispielsweise mit sehr kleinen Stichproben und ziehen falsche Schlüsse aus statistischen Auswertungen. Forschungsinstitutionen versuchen, dem entgegenzuwirken – etwa mit geänderten Förderkriterien.



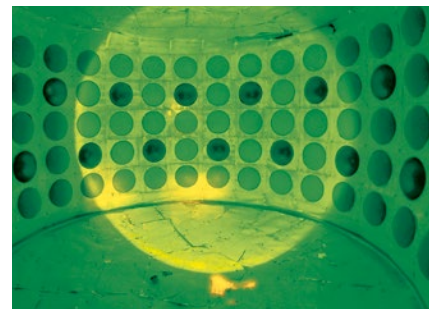
METAMORPHOSIS / GETTY IMAGES / ISTOCK



WARDKATZ / ISTOCK.ADOBE.COM

PLASTIKRECYCLING

Chemische Verfahren sollen bislang nicht verwertbare Kunststoffabfälle zu einer Art Rohöl verarbeiten, aus dem sich wiederum neue Materialien gewinnen lassen. Doch helfen die Technologien wirklich, das Plastikmüllproblem zu lösen?



LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY (LANL); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DAS SCHEUESTE ALLER NEUTRINOS

Bisher sieht das Regelwerk der Physik bloß drei Neutrinoarten vor. Aber seit längerem spekulieren Theoretiker über eine vierte Variante der schwer nachweisbaren Teilchen. Diese »sterilen« Neutrinos würden überhaupt nicht mit Materie interagieren – und doch soll ein neues Experiment sie nun nachweisen.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
[spektrum.de/newsletter](https://www.spektrum.de/newsletter)

Verpassen Sie keine Ausgabe!

Bestellen Sie jetzt Ihr persönliches Abonnement, und profitieren Sie von vielen Vorteilen!



ERSPARNIS:

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



KOMBIABO:

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



Spektrum PLUS:

Spektrum PLUS bietet exklusiv für Abonnenten kostenlose Downloads und Vergünstigungen, 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 **30** 23.07.2020

- > Komet NEOWISE kommt Erde am nächsten
- > Bakterien bilden Manganknollen in der Spüle
- > Arktisches Meereis auf Rekordtief

TITELTHEMA: COVID-19

Was bleibt, wenn das Virus geht

Die meisten Menschen werden nach einer Infektion mit Sars-CoV-2 wieder fit. Aber nicht alle. Langsam wird bekannt, für welch langfristigen Schäden Covid-19 sorgen kann.

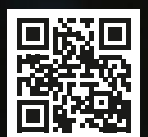
MARSMISSION DER EMIRATE
»So etwas hat noch kein arabischer Staat versucht«

GENTECHNIK
Aus Cytosin mach Uracil mach Thymin

LANDWIRTSCHAFT
Elternzeit für Milchkühe

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



POLYMERE

ALLESKÖNNER DER MODERNE

EIN MAGAZIN DER
GESELLSCHAFT
DEUTSCHER CHEMIKER



AUFSTIEG

DIE ENTDECKUNG
DER RIESENMOLEKÜLE

UMWELT

RECYCLING GEGEN
DIE PLASTIKVERMÜLLUNG

ZUKUNFT

KUNSTSTOFFE FÜR
NEUE TECHNOLOGIEN



Wir entdecken Chemie

für eine bessere Welt!

Die Wurzeln der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) reichen zurück bis ins Jahr 1867. Damals wurde in Berlin die Deutsche Chemische Gesellschaft gegründet, die nach dem Zweiten Weltkrieg zusammen mit dem 1887 gegründeten Verein Deutscher Chemiker zur heutigen GDCh verschmolz.

Mit rund 31 000 Mitgliedern aus Wissenschaft, Wirtschaft und freien Berufen gehört die GDCh zu den größten chemiewissenschaftlichen Gesellschaften der Welt. Sie gliedert sich in 27 Fachgruppen sowie weitere Arbeitskreise und

Arbeitsgemeinschaften, die spezielle Fachgebiete vertreten. Mit 60 Ortsverbänden ist die GDCh in allen chemierelevanten Regionen Deutschlands präsent. Die rund 9000 Studenten, Doktoranden und Berufsanfänger sind im »JungChemikerForum« organisiert.

Die gemeinnützige GDCh hat zum Ziel, die Chemie in Lehre, Forschung und Anwendung zu fördern. Darüber hinaus will sie Verständnis und Wissen von der Chemie sowie von chemischen Zusammenhängen in der Öffentlichkeit vertiefen.

Neben den »Nachrichten aus der Chemie« gibt die GDCh zahlreiche Fachzeitschriften heraus – darunter mit der deutschen und internationalen Edition der »Angewandten Chemie« eine der weltweit renommiertesten überhaupt.

Der »Karl-Ziegler-Preis« und der »Otto-Hahn-Preis« – Letzteren verleiht die GDCh gemeinsam mit der Stadt Frankfurt am Main und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft – zählen zu den höchstdotierten Auszeichnungen für Naturwissenschaftler in Deutschland.

WWW.GDCH.DE

LIEBE LESERINNEN, LIEBE LESER,

vor 100 Jahren, also im Jahr 1920, beschrieb der deutsche Chemieprofessor Hermann Staudinger erstmals eine damals vollkommen unbekannte Stoffklasse: die Makromoleküle. Dafür wurde er 1953 mit dem Nobelpreis für Chemie geehrt. Die Verknüpfung von kleinen Molekülen zu größeren Makromolekülen (Polymeren) hat zu einer Vielzahl von Verbindungen geführt, die wir heute meist als Kunststoffe oder Plastik bezeichnen.

So vielfältig wie die Eigenschaften der Kunststoffe, so vielfältig sind ihre Anwendungen. Ohne Kunststoffe könnten wir unser modernes Leben nicht führen: Die meisten unserer Lebensmittel, Körperpflegeprodukte und vieles mehr sind in Kunststoff verpackt, unsere Smartphones, unsere Autos und Fahrräder und viele unserer Sportgeräte enthalten Kunststoffe. Ab Seite 8 finden Sie einen Überblick, welche Arten von Kunststoffen wo eingesetzt werden.

Plastik hat jedoch auch seine Schattenseiten, nämlich dann, wenn Kunststoffabfälle durch unsachgemäße Entsorgung in die Umwelt gelangen. Ihre hohe Beständigkeit und Langlebigkeit wird zum Problem, wenn Kunststoffe mehrere hundert Jahre brauchen, bis sie sich zersetzen. Oder sie zerfallen in kleine Teilchen, die man als Mikroplastik überall, auch in Tieren und über die Nahrungskette wieder in Menschen finden kann. An Lösungen wird weltweit intensiv geforscht. Wissenschaftler arbeiten daran, Polymere zu entwickeln, die sich in kurzer Zeit zu unschädlichen Endprodukten zersetzen, oder Kunst-

stoffe zu recyceln und die Rohstoffe erneut zu verwenden. Einige Beispiele für aktuelle Forschungsprojekte finden Sie ab Seite 12.

Aber gerade in diesen Zeiten, in denen die Lungenkrankheit Covid-19 die Welt buchstäblich in Atem hält, sehen wir auch, warum wir auf Kunststoffe nicht verzichten können. Plexiglas-Scheiben, zum Beispiel an Supermarktkassen, schützen gleichermaßen Mitarbeiter und Kunden. Wir verwenden Schutzmasken und -handschuhe, um uns Viren vom Leib zu halten, und Patienten im Krankenhaus sind auf

Schläuche für Beatmungsgeräte, sterile Spritzen und geeignete Verpackungen für Medikamente angewiesen. Alle diese Materialien sind aus Kunststoffen gefertigt.

Wenn Sie mehr über Kunststoffe und ihre Anwendungen erfahren möchten, dann schauen Sie auf den Webseiten von »Faszination Chemie« vorbei. Unter <https://faszinationchemie.de/makromolekulare-chemie> finden Sie viele weitere Beiträge.

WIR WÜNSCHEN IHNEN VIEL
FREUDE BEI DER LEKTÜRE.

KATRINA FRIESE



PROF. DR. PETER R. SCHREINER
PRÄSIDENT
DER GDCH

FRAUKE ZBIKOWSKI



PROF. DR. WOLFRAM KOCH
GESCHÄFTSFÜHRER
DER GDCH

UMSCHLAGBILD

Am Anfang vieler Kunststoffprodukte steht so genanntes Granulat, eine Mischung aus Polymer, Farbstoff und anderen Zusätzen. Bei der Verarbeitung wird das Granulat zunächst aufgeschmolzen und anschließend etwa zu einer Folie geblasen oder mit Hilfe eines Werkzeugs zum Produkt ausgeformt.

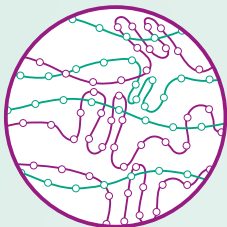
raeva / Getty Images / iStock

VIELSEITIG UND ALLGEGENWÄRTIG

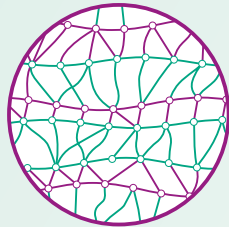
KUNSTSTOFFE AUS SYNTHETISCHEN UND NATÜRLICHEN POLYMEREN ERMÖGLICHEN UNSER MODERNES LEBEN. SIE SIND LEICHT UND BELASTBAR, LASSEN SICH ZU FASERN UND FOLIEN VERARBEITEN, AUFSCHÄUMEN UND IN JEDE ERDENKLICHE FORM BRINGEN.

PLASTISCH UND ELASTISCH

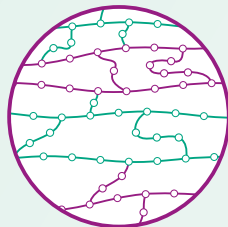
Je nach Struktur der Polymere unterscheiden sich Kunststoffe in ihren physikalischen Eigenschaften:



Thermoplaste bestehen aus unnetzten Polymeren und können durch Erhitzen beliebig oft plastisch geformt werden.

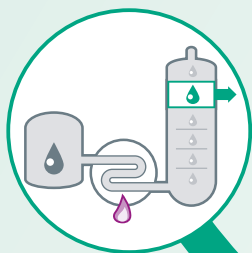


Duroplaste sind formstabile Kunststoffe aus engmaschig vernetzten Polymeren. Sie sind meist hart und spröde.



Elastomere aus schwach vernetzten Polymeren kann man ziehen oder quetschen: Sie nehmen stets wieder ihre ursprüngliche Form an.

Thermoplastische Elastomere kombinieren harte und weiche Phasen verschiedener Polymere und lassen sich warm umformen.

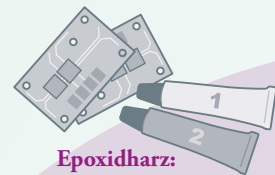
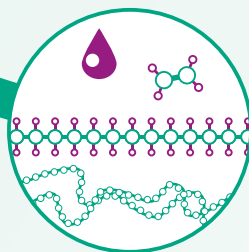


In Raffinerien wird Erdöl durch **Destillation** in mehrere Fraktionen getrennt. Für die Produktion von Kunststoffen ist das **Rohbenzin** (Naphtha) am wichtigsten. Durch **thermische Spaltung** (Cracking) entstehen daraus Ethylen, Propylen, Butylen und andere Kohlenwasserstoffe, aus denen **lange Molekülketten** synthetisiert werden können (Polymerisation).

VOM ÖL ZUM KUNSTSTOFF

Polymere bestehen aus verketteten organischen Molekülen (Monomeren). Die meisten Kunststoffe basieren auf synthetischen Polymeren aus Kohle, Erdgas und vor allem Erdöl.

Beispiele für natürliche Polymere sind Zellulose, DNA, Proteine und Naturkautschuk.



Epoxidharz: Leiterplatten, Zweikomponenten-Epoxidkleber



Polyamid: Fallschirme

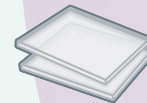
Sonstige



Polycarbonat: Autoscheinwerfer



Polyurethan: Sitzpolster



Polymethylmethacrylat: Plexiglas

PS

Polystyrol



Fassaden-dämmung



Stoßstangen

PP

Polypropylen



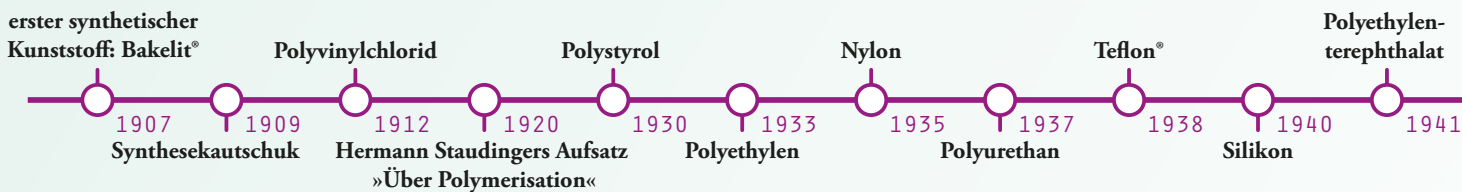
Kindersitze

31%

5%

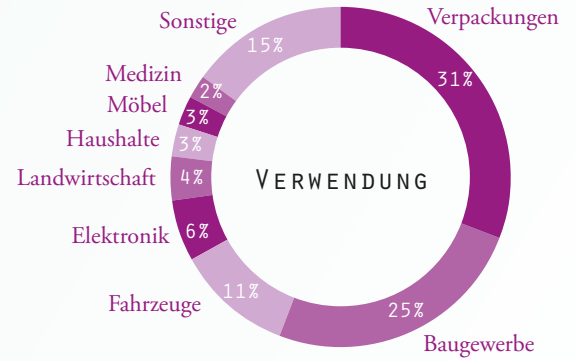
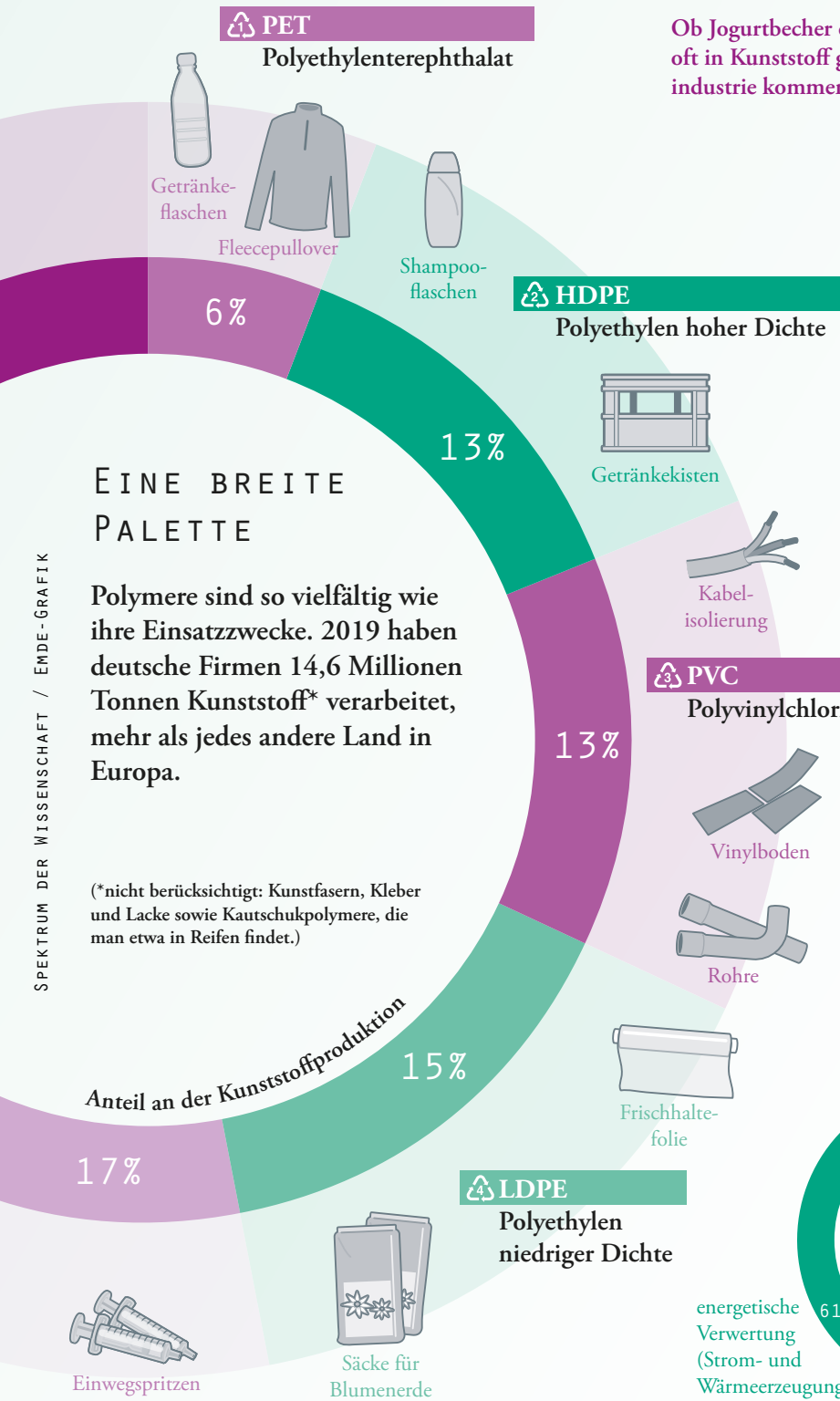
PLASTIK EROBERT DIE WELT

Viele synthetische Polymere wurden in den 1930er bis 1950er Jahren entdeckt. Seitdem ist die Produktion rasant gestiegen. Bis heute wurden weltweit mehr als neun Milliarden Tonnen Kunststoff produziert. Etwa jedes dritte Kunststoffteil stammt mittlerweile aus China. Zunehmend problematisch: Immer mehr Plastik landet in der Umwelt.



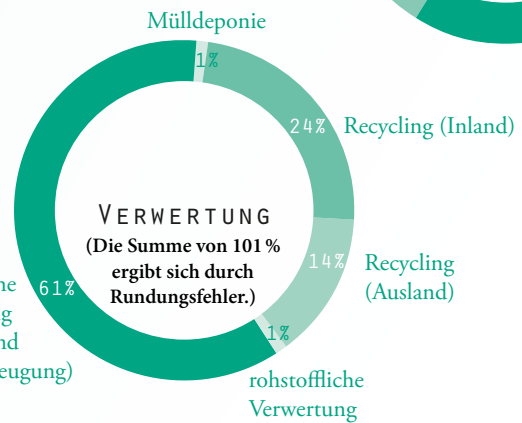
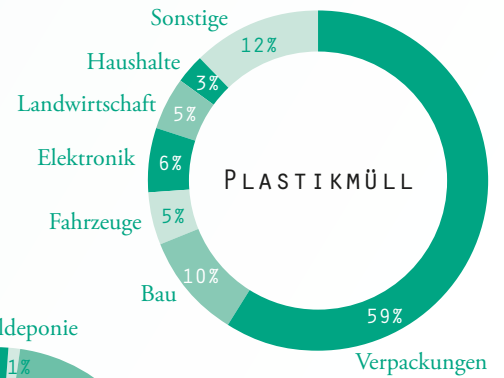
MEHR ALS NUR VERPACKUNG

Ob Jogurtbecher oder Zahnpastatube: Lebensmittel und Kosmetika sind oft in Kunststoff gehüllt. Auch auf dem Bau oder in der Auto- und Elektroindustrie kommen polymere Werkstoffe zum Einsatz.

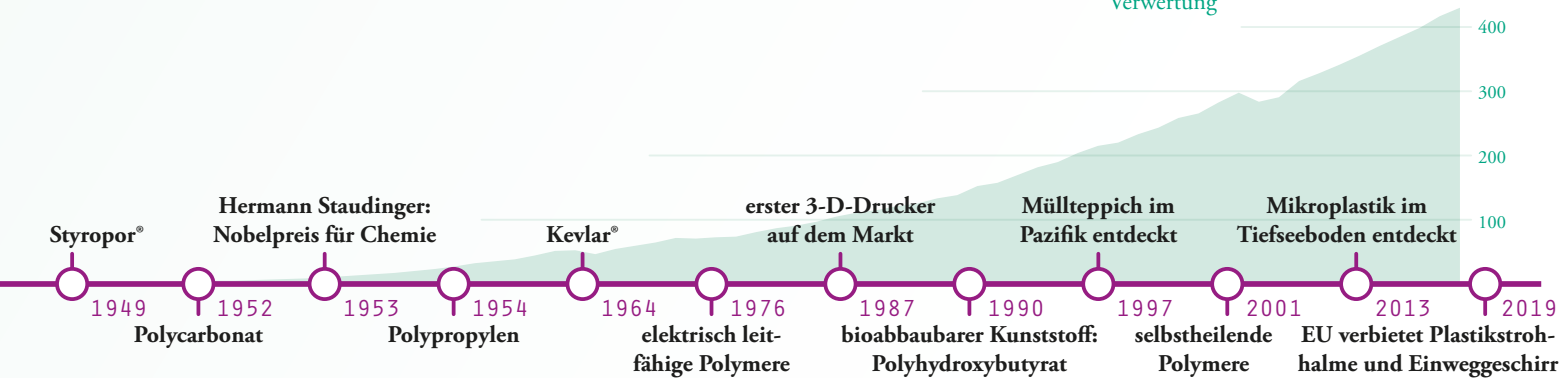


AB IN DIE TONNE

Deutschlands Bürger entsorgen pro Jahr 5,2 Millionen Tonnen Kunststoff, vor allem Verpackungen. Der Abfall wird überwiegend verbrannt, ein Teil recycelt und als Rezyklat zu neuen Produkten verarbeitet.



weltweite Plastikproduktion inkl. Kunstfasern in Mio. Tonnen pro Jahr



INS REICH DER RIESENMOLEKÜLE

VOR 100 JAHREN POSTULIERT EIN DEUTSCHER CHEMIKER
DIE EXISTENZ BELIEBIG GROBER MOLEKÜLE UND
ERNET DAFÜR VON VIELEN KOLLEGEN SPOTT UND
KRITIK. DOCH SEINE THEORIE BEWAHRHEITET
SICH UND EBNET DEN WEG FÜR DEN RASANTEN AUFSTIEG
DER KUNSTSTOFFINDUSTRIE.

Riesen gibt es nur im Märchen. Wenn man so will, galt das bis in die 1920er Jahre auch in der Chemie. Moleküle aus Hunderttausenden oder gar Millionen von Atomen hält die Fachwelt zu jener Zeit für ein Hirngespinnst. Die Grundbausteine aller Stoffe sind Atome oder kleine Moleküle, besagt die vorherrschende Lehrmeinung. Doch ein junger Chemieprofessor namens Hermann Staudinger lässt sich davon nicht beeindrucken und macht sich auf die Suche nach den molekularen Riesen.

Es ist keine Forschungsexpedition im eigentlichen Sinne. Denn auf die Frage, ob chemische Verbindungen aus derart vielen Atomen tatsächlich existieren, können ausschließlich wissenschaftliche Theorien und Experimente eine Antwort liefern. Ähnlich wie die Entdeckung manch ferner Länder jedoch entpuppt sich Staudingers Reise in die unbekanntenen Gefilde der organischen Chemie als wahre Odyssee. Aber der Reihe nach.

Wir schreiben das Jahr 1920. Der Erste Weltkrieg (1914–1918) ist seit Kurzem vorüber und Europa aus den Fugen geraten. Hermann Staudinger, der in jenem Frühjahr 39 wird, ist Professor

für Chemie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Dort erforscht er unter anderem den molekularen Aufbau von Biopolymeren wie Naturkautschuk, einem kriegswichtigen Rohstoff, aus dem Gummi hergestellt wird, und pflanzlicher Zellulose für die Papier- und Textilindustrie.

Zwar hatten Polymere in den wissenschaftlichen Sprachgebrauch bereits einige Jahrzehnte zuvor Einzug gehalten, doch über ihre Struktur oder ihr Molekulargewicht ist bis dahin noch wenig bekannt. Eingeführt wurde der Begriff im Jahr 1829 von dem schwedischen Chemiker Jöns Jakob Berzelius. Er beobachtete bei Experimenten mit Weinsäure, dass sich Stoffe trotz identischer chemischer Zusammensetzung in ihrer Erscheinungsform und bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften unterscheiden können. Berzelius nannte solche niedermolekularen Stoffe Polymere (griechisch: *polý* = viele, *méros* = Teilchen).

Die Bedeutung des Begriffs wandelte sich jedoch mit der Zeit: Im frühen 20. Jahrhundert bezeichnen Chemiker solche Materialien als Polymere, die ein vermeintlich hohes Molekulargewicht

aufweisen. Darauf deutet nämlich die geringe Flüchtigkeit von polymeren Stoffen hin. Die Wissenschaftler glauben allerdings, dass das die Existenz riesiger Moleküle nur vortäuschen würde. Stattdessen versuchen sie die Beobachtungen mit so genannten Kolloiden, einer losen Zusammenlagerung vieler kleiner Moleküle, zu erklären.

SEINER ZEIT VORAUSS

Einen Beleg für diese These liefern ihrer Meinung nach Röntgenstrukturanalysen. Damit lässt sich die Größe einzelner Kristallite in Polymeren bestimmen. Kristallite sind Kristalle, die die eigentliche Kristallform nicht oder nur teilweise ausbilden. Sie entstehen, wenn Polymere abkühlen und erstarren. Die Mehrzahl der Wissenschaftler ist überzeugt: Ein einzelnes Molekül kann nicht größer sein als ein einzelner Kristallit. Daher folgern sie aus ihren Messungen, dass kettenartige Verbindungen aus maximal 500 Atomen bestehen. Die Existenz größerer Makromoleküle lehnen sie vehement ab.

Staudinger kommt durch eigene Überlegungen und jahrelange Experimente zu einem anderen Schluss. Am 12. Juni 1920



BLACKJACK3D / GETTY IMAGES / ISTOCK

BLACKJACK3D / GETTY IMAGES / ISTOCK

veröffentlicht er seine These in den »Berichten der Deutschen Chemischen Gesellschaft«:

»Polymerisationsprozesse [...] sind alle Prozesse, bei denen zwei oder mehrere Moleküle sich zu einem Produkt mit gleicher Zusammensetzung, aber höherem Molekulargewicht, vereinigen.« Auf diese Weise könne ein chemisches Molekül »eine fast beliebige Größe erreichen«, mithin zu einem Riesemolekül anwachsen. »Immer gleiche oder ähnliche kleine Atomgruppen reihen sich in ständiger Wiederholung zu einem Muster aneinander, wodurch schließlich die enorme Größe des Makromoleküls produziert wird.«

Mit seinem Aufsatz »Über Polymerisation« wird Hermann Staudinger – in der Rückschau – zum Begründer der Polymerchemie.

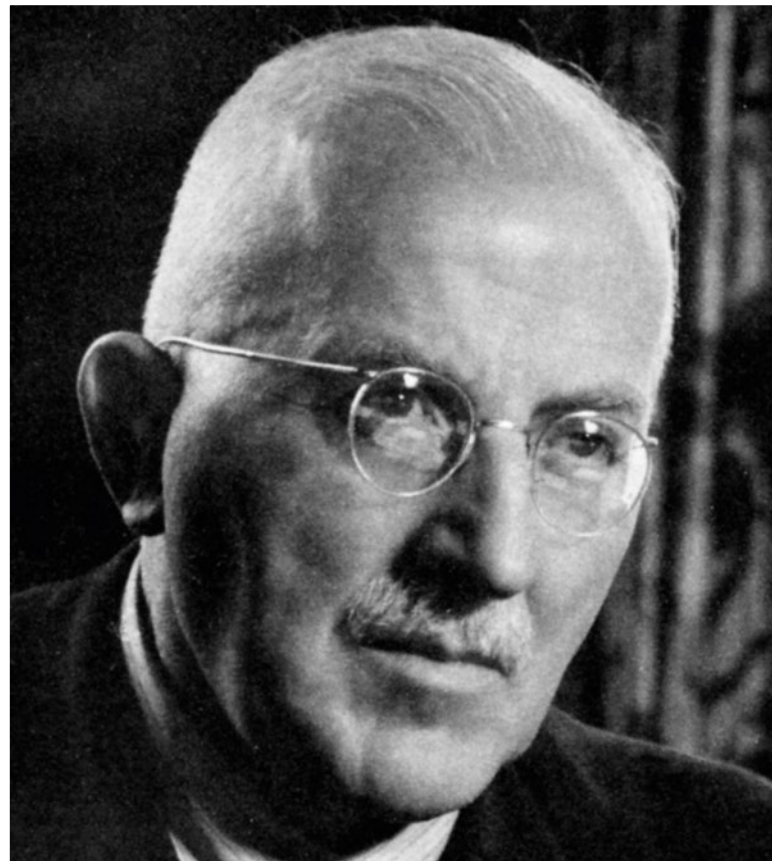
In den 1920er Jahren ist die Zeit noch nicht reif für ein neues Bild vom Mikrokosmos der Moleküle. In Deutschland ist die Monarchie Vergangenheit, und es entsteht eine neue Gesellschaftsordnung. Mitten in diesem Umbruch wagt es Staudinger auch noch, die Welt im Aller kleinsten ins Wanken zu bringen.

Seine Gegner verspotten ihn dafür. Einem Zuhörer reist bei einem Vortrag der Geduldsfaden. Er erhebt sich und brüllt in den Saal: »So etwas gibt es nicht!« Damit spricht der Kollege das aus, was praktisch die gesamte Fachwelt von Staudingers Ideen hält.

Staudingers These basiert in erster Linie auf Experimenten mit Naturkautschuk, der als Basis für die industrielle Herstellung von Gummi dient. Das dabei angewandte Verfahren der Vulkanisation geht zurück auf Charles Goodyear, der im Jahr 1839 entdeckte, dass sich klebriger

Naturkautschuk durch die Zugabe von Schwefel in einen elastischen Kunststoff umwandeln lässt.

Nach der damals vorherrschenden Lehrmeinung besteht Kautschuk aus ringförmigen Kolloiden, die von je zwei Isopren-Molekülen gebildet werden, einer ungesättigten Kohlenwasserstoffverbindung (C_5H_8). Staudinger glaubt hingegen, dass Tausende von Isopren-Molekülen im Kautschuk wie Perlen auf einer Schnur chemisch miteinander verknüpft sind. Seine These gründet sich auf Experimente, in denen er versucht,



ALAMY / MATTEO ONTIED

HERMANN STAUDINGER

Der deutsche Chemiker erkannte als Erster, dass Moleküle sich zu langen Ketten aneinanderreihen können. Für die Entdeckung der Makromoleküle erhielt er 1953 den Chemie-Nobelpreis.

die vermeintlichen Isopren-Moleküle mit Wasserstoff (H_2) zu gesättigtem Isopentan (C_5H_{12}) umzusetzen. Nach traditioneller Vorstellung würde die Kautschukmasse dadurch flüssiger werden, da sich gesättigte Kohlenwasserstoffe nicht ringförmig zusammenlagern können. Tatsächlich aber bleibt die hohe Viskosität erhalten – was Staudinger damit erklärt, dass Kautschuk aus langkettigen Makromolekülen besteht.

AMBITIEN UND TALENT

Die Ergebnisse überzeugen seine Gegner und notorische Zweifler jedoch nicht. Selbst dann nicht, als Staudinger und der Physiker Gustav Mie 1927 mit Hilfe von Röntgenaufnahmen nachweisen, dass im Polyoxymethylen nur kurze Abschnitte, aber nicht das gesamte Molekül einen Kristallit ausbilden. So schreibt beispielsweise der Chemie-Nobelpreisträger Heinrich Wieland 1928 an Staudinger: »Lieber Herr Kollege, lassen Sie doch die Vorstellung mit den großen Molekülen [...]. Reinigen Sie Ihre Produkte, wie zum Beispiel den Kautschuk, dann werden diese kristallisieren und sich als niedermolekulare Stoffe erweisen.«

Staudinger lässt sich davon allerdings nicht beirren. Nicht zum ersten Mal steht er mit seiner Meinung ziemlich allein da: Als einziger deutscher Chemiker sprach er sich während des Ersten Weltkriegs öffentlich gegen die Entwicklung und den Einsatz chemischer Massenvernichtungs-

waffen aus. Auch forderte er 1917 das deutsche Oberkommando in Berlin auf, das sinnlose Blutvergießen zu beenden. Während das Militär lediglich Soldaten und Waffen zähle, so Staudinger, sei der Krieg angesichts der hohen Wirtschaftskraft der USA nicht mehr zu gewinnen.

Mögliche Gründe für Staudingers selbstbewusste und standhafte Persönlichkeit finden sich in seiner jungen Erwachsenenzeit, als er erst über Umwege eine akademische Laufbahn einschlägt, dann aber schnell Karriere macht: 1899 legt Staudinger das Abitur in seiner Geburtsstadt Worms ab. Sein Vater Franz – so heißt es – empfiehlt ihm, zunächst einen bodenständigen Beruf zu erlernen. Also absolviert Hermann eine Lehre als Tischler. Die Schreinerarbeit erfüllt ihn jedoch nicht, stattdessen brennt er für die Pflanzenkunde. Nach seiner Handwerksausbildung bekommt er vom Vater den Segen für ein Studium und schreibt sich an der Universität Halle/Saale im Fach Botanik ein.

Kurz darauf greift der Vater erneut in die Berufswahl ein: Hermann solle sich zuerst der Chemie widmen, um die Botanik besser verstehen zu können. Und so beginnt er in Darmstadt – nachdem die Familie Staudinger dorthin gezogen

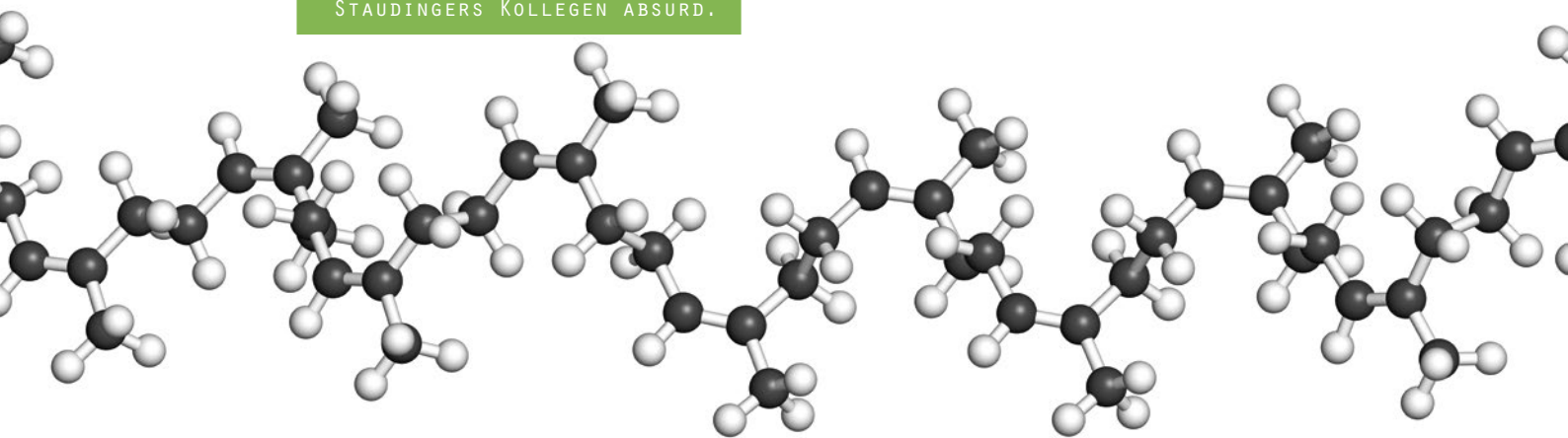
1920 VERÖFFENTLICHT
HERMANN STAUDINGER
»ÜBER POLYMERISATION«
UND LEGT DAMIT
DEN GRUNDSTEIN DER
POLYMERCHEMIE.



ist – an der Technischen Hochschule mit dem Chemiestudium. Nach zwei Semestern legt er das Verbandsexamen ab, die Voraussetzung für eine Promotion, und im Jahr 1903 verleiht ihm die Universität Halle/Saale den Dokortitel. Mit gerade einmal 27 Jahren wird er 1907 Professor für organische Chemie an der Technischen Hochschule Karlsruhe. 1912 wechselt er an die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Nach 14 Jahren Forschung in der Schweiz folgt er 1926 schließlich einem Ruf als Professor für Chemie an die Universität Freiburg.

Ende der 1920er Jahre beginnt die Front gegen die These der Makromoleküle allmählich zu bröckeln. Denn Laborversuche haben mittlerweile

KAUTSCHUKPOLYMERE AUS TAUSENDEN
ISOPREN-EINHEITEN ERSCHEINEN
STAUDINGERS KOLLEGEN ABSURD.



bestätigt, dass die Glieder der postulierten Kettenmoleküle tatsächlich Atombindungen eingehen. Staudinger selbst schreibt dazu sinngemäß und korrekterweise: Der experimentelle Beweis sei dann erbracht, wenn sich ein Stoff in Derivate (abgeleitete Verbindungen) verwandele, ohne dass sich dabei sein Polymerisationsgrad ändere. Übersetzt heißt das: Die Atombindungen der Makromoleküle werden bei einer chemischen Reaktion nicht gespalten. Dieser Nachweis gelingt für immer mehr natürliche und synthetische Polymere, etwa für Zellulose, Stärke oder Polyvinylacetat.

Die Beweise sind so erdrückend, dass Anfang der 1930er Jahre immer mehr Chemiker – zumeist kleinlaut – ins makromolekulare Lager wechseln. Für Staudinger eine große Genugtuung. Er wird zum gefeierten Star in der Chemie-szene und erfährt nun weltweit Anerkennung. Auf seinem Erfolg ausruhen kann er sich allerdings nicht. Denn schon bald sieht er sich mit einem mächtigeren Gegner konfrontiert als mit spöttischen Kollegen: den Nationalsozialisten.

EINE NEUE INDUSTRIE

Vor allem der Rektor der Universität Freiburg, der Philosoph Martin Heidegger, sieht es als NSDAP-Mitglied als seine Pflicht an, alle Kollegen auf ihre »deutsche Gesinnung« zu überprüfen. Bei Staudinger bezweifelt er diese, unter anderem wegen dessen pazifistischer Äußerungen während des Ersten Weltkriegs. Auch Staudingers Familie lässt unerwünschte politische Einstellungen vermuten: Sein Vater ist Teil der Genossenschaftsbewegung, seine Mutter Frauenrechtlerin und sein Bruder ein von den Nazis verfolgter Sozialdemokrat und USA-Emigrant. Heidegger stößt daher ein Amtsenthebungsverfahren an. Indem Staudinger bedingungslose Systemtreue an den Tag legt und vor allem, weil er eine sehr hohe Reputation in der internationalen Wissenschaftsgemeinde genießt, übersteht er auch diese Herausforderung. Er bleibt ordentlicher Professor der Chemie und Leiter des Chemi-

schen Laboratoriums der Universität. 1940 gründet er das Institut für Makromolekulare Chemie in Freiburg, das erste Polymerforschungszentrum Europas.

Parallel entwickelt sich basierend auf Staudingers Entdeckungen ein völlig neuer Industriezweig. Zwar produzieren Fabriken bereits Alltagsgegenstände wie Aschenbecher oder Telefone aus Bakelit®, dem ersten synthetischen Kunststoff, den der belgisch-amerikanische Chemiker Leo Baekeland im Jahr 1907 entdeckte. Aber ein mangelndes Verständnis des molekularen Bauprinzips von Kunststoffen erschwert weitere Fortschritte.


Staudingers theoretisches Fundament für die Polymerchemie verändert die Situation. Forschern gelingt es plötzlich, völlig neuartige Polymere mit unterschiedlichsten Eigenschaften herzustellen. In den 1930er bis 1950er Jahren erfinden Chemiker die Materialien der Zukunft: Polystyrol, Polyethylen, Polypropylen, Polyester, Polyamid und viele mehr. Sie eignen sich für eine Vielzahl von Anwendungen und können preiswert hergestellt werden. Je nach Zusammensetzung und molekularer Architektur sind die neuen synthetischen Kunststoffe weich oder stahlhart, elastisch oder formstabil. Sie lassen sich zu Fasern spinnen und in fast jede erdenkliche Form gießen.

Doch obwohl Kunststoffe rasch in viele Haushalte Einzug halten, ist

Hermann Staudinger außerhalb der Wissenschaftsgemeinde kaum jemandem ein Begriff. Das ändert sich erst 1953, als man ihm im Alter von 72 Jahren für seine Pionierarbeit auf dem Gebiet der Polymerchemie den Nobelpreis verleiht. Seinen Vortrag bei der Preisverleihung beendet er mit folgendem Satz:

»Im Licht dieser neuen Erkenntnisse der makromolekularen Chemie zeigt sich das Wunder des Lebens von seiner chemischen Seite her in der unerhörten Mannigfaltigkeit und meisterhaften molekularen Architektonik der lebenden Materie.«

Staudinger ahnte damals offenbar schon, dass der Bauplan von natürlichen Makromolekülen wie der DNA oder Proteinen den Zugang zu innovativen Werkstoffen mit vielfältigen Eigenschaften eröffnen würde. Und tatsächlich stellen Forscher heute etliche Polymere und Materialien nach biologischen Vorbildern her.

Damit ist Hermann Staudinger nicht nur der Vater der Makromolekularen Chemie, sondern gleichzeitig ein Pionier der bioinspirierten Materialforschung. 100 Jahre nach Erscheinen seines wegweisenden Aufsatzes und 55 Jahre nach seinem Tod (1965) ist die Entdeckungsreise im Reich der Riesemoleküle also noch immer in vollem Gange. 



TELEFONE AUS BAKELIT GEHÖREN
ZU DEN ERSTEN PRODUKTEN
AUS SYNTHETISCHEM KUNSTSTOFF.
NACH ENDE DES ZWEITEN
WELTKRIEGS WIRD PLASTIK ZUR
MASSENWARE.

POLYMERE: DIE MULTITALENTE

POLYMERE SIND VIELSEITIG EINSETZBAR UND HABEN
NAHEZU ALLE LEBENSBEREICHE EROBERT –
AUCH WENN SIE BISWEILEN UNSICHTBAR BLEIBEN.

Kaum ein Produkt kommt heute ohne Polymere aus. Schaut man sich in den eigenen vier Wänden um, fallen einem sofort etliche Kunststoffe auf, etwa Gehäuse von Elektrogeräten, Lebensmittelverpackungen oder diverse Küchenutensilien. Andere sind weniger offensichtlich und dennoch oft unverzichtbar.

Dass Kunststoffe omnipräsent sind, liegt vor allem an ihrer Vielseitigkeit. Jedes Polymer besitzt bestimmte Eigenschaften, die sich beim Herstellungsprozess oder durch chemische Zusätze für die jeweilige Anwendung modifizieren lassen. Das beginnt bei der Polymerisation, bei der sich die monomeren Grundeinheiten zu langen Molekülketten verbinden. Je nach Reaktionsbedingungen können dabei unterschiedlich lange

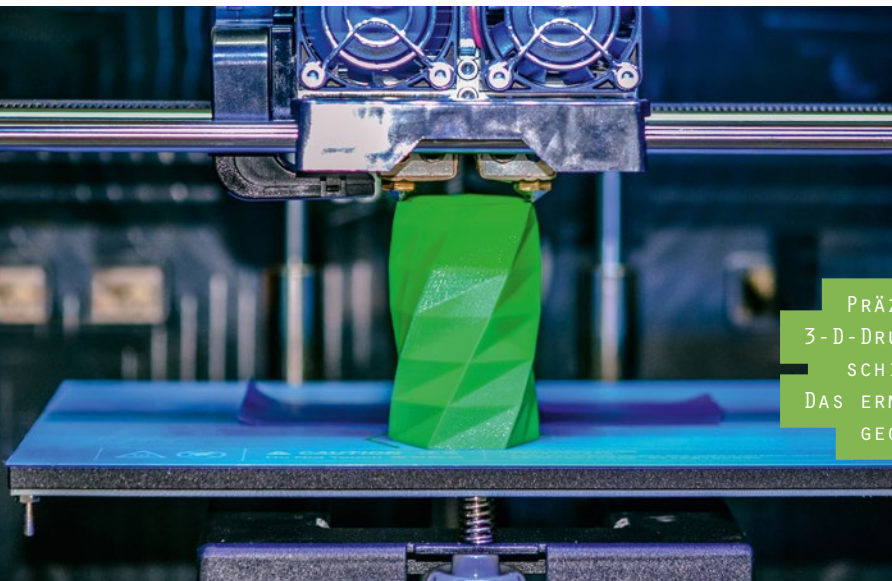
Polymere entstehen. Zusätzlich erlaubt das Anhängen funktioneller Gruppen, die Eigenschaften von Polymeren zu beeinflussen. Etwa wie flexibel, formbar, chemikalien- und hitzebeständig ein Produkt ist oder wie gut es sich recyceln lässt. Auch die Zugabe von Farbstoffen, Weichmachern, Flamm- und UV-Schutzmitteln bestimmt die Funktionalität von Kunststoffen.

Anhand ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften unterteilen sich Polymere in drei Gruppen: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere.

Thermoplaste findet man im Haushalt überall: Als Jogurtbecher oder Kosmetiktube, als PET-Flasche oder Kinderspielzeug, als Stoßstange oder Gehäuse der Autobatterie. Der Name beruht auf der

Eigenschaft, dass thermoplastische Polymere bei erhöhten Temperaturen einfach verformbar, sprich plastisch sind. Man kann sie aufschmelzen, in die gewünschte Form bringen und durch Abkühlen wieder erstarren lassen. Theoretisch lässt sich dieser Vorgang beliebig oft wiederholen, vorausgesetzt das Polymer wird nicht durch Überhitzung zerstört. Ein Beispiel für die Wiederverwertbarkeit thermoplastischer Kunststoffe sind Flaschen aus Polyethylenterephthalat (PET), die nach dem Recycling etwa zu Fleece verarbeitet werden. Auch das Dämm- und Verpackungsmaterial Polystyrol, besser bekannt als Styropor®, zählt zu den Thermoplasten.

Immer öfter bringt man thermoplastische Polymere mit Hilfe von 3-D-Druckern in Form. Dabei werden flüssige oder feste Materialien computergesteuert Schicht für Schicht zu einer räumlichen Struktur aufgebaut. Ein häufig verwendetes Polymer ist Polyamid 12; dank seiner hohen Zähigkeit und Flexibilität



PRÄZISIONSARBEIT: BEIM
3-D-DRUCK WERDEN KUNSTSTOFFE
SCHICHTWEISE AUFGEBAUT.
DAS ERMÖGLICHT AUCH KOMPLEXE
GEOMETRISCHE FORMEN.



GESTOCHEN SCHARF

Frühe Kontaktlinsen aus Glas waren wenig komfortabel. Die Entdeckung von Polymethylmethacrylat führte zur Entwicklung bequemer Kunststofflinsen. Weiche Linsen bestehen aus polymeren Hydrogelen.

BERNHARD RICHTER /
STOCK.ADOBE.COM

lässt es gut verarbeiten. Nützlich ist der 3-D-Druck etwa für die Produktion leichter, stabiler Auto- und Flugzeugteile. Auch Medizinprodukte wie Prothesen, künstliche Kniegelenke oder Zähne lassen sich so passgenau anfertigen. Die Weltraumforschung setzt ebenfalls auf gedruckte Kunststoffe: Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt hat mittels 3-D-Druck den Prototyp eines Erkundungsroboters entwickelt, der in Zukunft unbemannte Flüge zum Mars begleiten könnte.

Ein außerordentlich widerstandsfähiger Thermoplast ist Polyetheretherketon (PEEK). Das Material kann hohen mechanischen Belastungen standhalten und ist wesentlich leichter als Metall. Im Flugzeugbau ersetzt PEEK immer

häufiger früher genutzte Werkstoffe wie Aluminium, Titan oder Stahl. Das spart Gewicht und Materialkosten. In der Medizin nutzt man es auf Grund seiner guten Beständigkeit gegenüber ionisierender Strahlung beim Röntgen, beim Sterilisieren von Instrumenten und in der Strahlentherapie.

STEIF ODER FLEXIBEL

Im Gegensatz zu Thermoplasten können Duroplaste – oft auch als Duromere bezeichnet – nicht aufgeschmolzen und erneut verformt werden, wenn sie einmal ausgehärtet sind. Die Polymerstränge in einem Duroplast sind durch Atombindungen chemisch miteinander vernetzt und bilden auf diese Weise unlösliche Kunststoffe. Bearbeiten kann man sie

nach Aushärtung nur noch mechanisch, etwa mit einer Säge. In der Regel werden Duroplaste jedoch gleich in die gewünschte Form gegossen. Das kann zum Beispiel ein hitzebeständiger und zugleich leichter Schutzhelm für die Feuerwehr sein.

Typische Anwendungsbereiche von duroplastischen Kunststoffen sind Leichtbau und Wärmedämmung. Als Flügel von Windkraftanlagen oder als Isoliermaterial für Häuserfassaden helfen sie, grünen Strom zu gewinnen und Heizkosten einzusparen. Darüber hinaus findet man Duroplaste in Lacken und Klebstoffen, als Schaum in Polstermöbeln und Winterbekleidung oder – dank ihrer Temperaturbeständigkeit – in Kontakten, Steckern und den Gehäusen von Elektrogeräten.

Anders als Thermo- und Duroplaste sind Elastomere nicht steif, sondern, wie ihr Name erahnen lässt, elastisch verformbar. Man kann sie ziehen oder drücken, trotzdem nehmen sie immer wieder ihre ursprüngliche Form an. Ähnlich wie die harten Duroplaste können Elastomere durch Erhitzen nicht abermals umgeformt werden. Eine Ausnahme bilden hier die thermoplastischen Elastomere. Dabei handelt es sich entweder um Polymergemische (Legierungen) oder so genannte Copolymere, die aus harten und weichen Domänen bestehen.

ABDICHTEN, ABFEDERN, UND SCHALL ABSORBIEREN

Das vielleicht bekannteste und mit Abstand älteste Elastomer ist Naturkautschuk, der als Milchsaft aus der Rinde des Gummibaums gewonnen wird. In Mittelamerika nutzten ihn die indigenen Völker bereits vor Tausenden von Jahren. 1839 entdeckte der US-amerikanische Chemiker Charles Goodyear die Vulkanisation: Wenn man Naturkautschuk erhitzt und Schwefel dazugibt, wird er zu Gummi. Heutzutage wird er in großen Mengen vor allem als Beimischung für Reifen aller Art verwendet.

Weil Naturkautschuk nicht temperaturbeständig ist – bei Kälte wird er spröde, bei Hitze klebrig – und dazu empfindlich gegenüber vielen Chemikalien, wurde schon früh nach synthetischen Ersatzstoffen gesucht. Zwischen den beiden Weltkriegen entwickelten Wissenschaftler zahlreiche Synthetikgumme. Inzwischen gibt es rund 25 Klassen, die jeweils etliche Sorten umfassen. Daraus werden Elastomere für ein breites Temperaturspektrum und mit maßge-

schneiderter Chemikalienbeständigkeit hergestellt.

Elastomere kommen häufig dort zum Einsatz, wo es gilt, Holz, Metalle oder Kunststoffe miteinander zu verbinden. Als Dichtungen verhindern sie, dass Rohrleitungen Wasser verlieren, Fenster kalte Luft hereinlassen oder die Ölwanne unter dem Auto leckt. Auch sonst sind elastische Kunststoffe im Haushalt weit verbreitet: Gummistiefel, Gummibänder, Radiergummis, Haargummis – um nur ein paar Beispiele zu nennen.

Ein anderes wichtiges Anwendungsfeld ist die Schwingungstechnik. In Autos dämpfen Elastomere Vibrationen, die im Motor entstehen oder von holprigen Straßen herrühren. Auf Grund ihrer Elastizität können sie die Schwingungen aufnehmen und abfedern. Dieses Prinzip macht man sich auch bei vibrierenden Haushalts- oder Elektronikgeräten zu Nutze, indem man ihnen Gummifüße verpasst. Auf Spielplätzen federn Matten aus Elastomeren die Sprünge der Kinder

ab, in Schulen sowie in Krankenhäusern sorgen Böden aus Synthetikgummi für gedämpfte Trittergeräusche.

Neben der Verformung müssen Elastomere zum Teil aggressiven Flüssigkeiten oder extremen Temperaturen standhalten. Materialermüdung ist bei diesen Kunststoffen daher ein großes Thema. Um die Haltbarkeit von synthetischem Gummi zu verbessern, mischt man häufig mehrere Polymere. Dazu kommen – je nach Anwendung – Alterungsschutzmittel, Weichmacher, Flammenschutzmittel, Farbstoffe und andere Additive.

Auch bei Thermoplasten und Duroplasten ist die Alterung des Materials gelegentlich ein Problem. So leiden etwa billiges Kinderspielzeug oder einfache Gartenmöbel unter dauerhafter Sonneneinstrahlung. Der UV-Anteil im Licht der Sonne sorgt dafür, dass Kunststoffe allmählich verblassen und brüchig werden. Abhilfe schaffen hier so genannte hochwetterstabile Polymere mit einge-

ARTINUN / STOCK.ADOBE.COM

BIOPOLYMERE AUF
ZUCKERBASIS SORGEN DAFÜR,
DASS MEDIKAMENTE IM
KÖRPER DORT FREI WERDEN,
WO SIE WIRKEN.



bautem UV-Schutz. Sie werden zum Beispiel auch in Autolacken sowie als Werkstoffe für Windkraftanlagen verwendet.

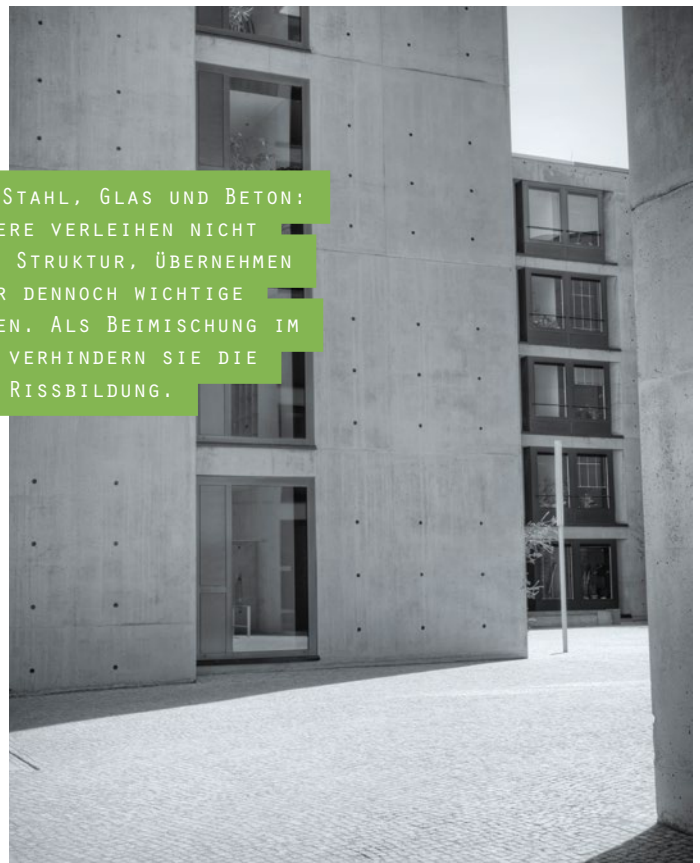
In der Medizin hingegen setzt man bewusst auf kurzlebige Kunststoffe. So werden verschiedene Wirkstoffe mit Biopolymeren aus Polysacchariden (Vielfachzuckern) wie Zellulose oder mit synthetischen Polymeren ummantelt, die sich nur ab einem bestimmten pH-Wert auflösen. Sie sind resistent gegenüber Magensäure, so dass die Kapsel ihren Inhalt erst im Darm freisetzt, wo ein leicht basisches Milieu herrscht. Das hat den Vorteil, dass ein Medikament langsam an den Körper abgegeben wird. Dadurch muss nicht alle paar Stunden eine neue Kapsel eingeworfen werden, um eine konstante Wirkstoffkonzentration aufrechtzuerhalten.

Ebenfalls in der Medizin zum Einsatz kommen Hydrogele aus dreidimensional vernetzten Polymeren. Sie können große Mengen Wasser oder anderer Flüssigkeiten einlagern. Dabei quellen sie auf, behalten ihre Struktur jedoch bei, ohne sich aufzulösen. Diese Eigenschaft nutzt man zum Beispiel für Wundpflaster. Bei Tumor-Operationen verwendet man ebenfalls solche Hydrogele: Sie geben einen Wirkstoff für die Immunabwehr nach einer Operation über Wochen ab und verhindern so, dass sich möglicherweise verbliebene Krebszellen schnell wieder ausbreiten. Bei Herzinfarkten wiederum dienen Hydrogele als Zellgerüst und unterstützen die Heilung beschädigter Gewebe.

POLYMERE FÜR GUTEN SCHLAF UND FARBECHTE WÄSCHE

Auf eine ganz andere Art wirken funktionale Polymere, auch als Enabling-Technologie bekannt (von englisch: to enable = ermöglichen, befähigen). Die Polymere bilden in diesem Fall nicht die Struktur selbst, sondern verändern die Eigenschaften anderer Materialien um sie herum. Nehmen wir das Beispiel Beton: Dem Baustoff sind heutzutage oft funktionale Polymere beigemischt. Sie sorgen dafür,

MEHR ALS STAHL, GLAS UND BETON:
POLYMERE VERLEIHEN NICHT
ZWINGEND STRUKTUR, ÜBERNEHMEN
ABER DENNOCH WICHTIGE
FUNKTIONEN. ALS BEIMISCHUNG IM
BETON VERHINDERN SIE DIE
RISSBILDUNG.



dass frischer Beton flüssig ist, ohne zu viel Wasser zu enthalten. Denn überschüssige Flüssigkeit führt beim Aushärten zur Bildung von Poren und Rissen. Durch die Zugabe funktionaler Polymere kann der Wasseranteil reduziert werden. Der Beton bleibt fließfähig, lässt sich aber trotzdem gut verarbeiten.

Auch bei der Verwendung von Polyurethan – egal ob als Elastomer für Schaumstoffmatratzen oder als hartes Duromer für Leichtbauanwendungen – kommen solche funktionalen Polymere zum Einsatz. Polyurethan wird mit Hilfe von Gasen oder Flüssigkeiten aufgeschäumt. Für die richtige Größe und die Form der Poren sorgen dabei Polyethersiloxane, siliziumhaltige Polymere aus der Gruppe der Silikone. Sie werden in sehr geringen Mengen zugesetzt, um Polyurethanschäume einer gewünschten Konsistenz zu erhalten. Dadurch lässt sich beispielsweise der Härtegrad von Matratzen variieren. Obwohl die Polyethersiloxane unsichtbar bleiben, haben sie einen großen Einfluss auf die Beschaffenheit des Kunststoffs.

Auf weitere Anwendungen funktionaler Polymere stößt man im Haushalt:

Das wasserunlösliche Polyvinylpyrrolidon etwa sorgt als Waschmittelzusatz dafür, dass Farbstoffe aus bunten Textilien die übrige Wäsche nicht verfärben. Gleichzeitig verhindern sie, dass sich Salze oder andere Rückstände in der Waschmaschine ablagern.

Bei der Papierherstellung verwendet man so genannte Polyelektrolyte, positiv geladene Polymere. Sie binden an die negativ geladenen Oberflächen der Papierfasern, so dass diese zusammenkleben. So sorgen die funktionalen Polymere für eine höhere Festigkeit von Papier oder Karton. Außerdem verdrängen sie hydrophobe (Wasser abweisende) Stoffe, welche die Papiermaschinen stören würden, und helfen bei der Entwässerung des Papiers.

Zuletzt dürften sehr viele Eltern die Eigenschaften des Superabsorbers Polyacrylsäure in Windeln schätzen: Die vernetzten Polymere der Polyacrylsäure können ähnlich wie Hydrogele erhebliche Mengen an Flüssigkeit aufnehmen, bis zum 1000-Fachen ihres eigenen Gewichts. Das Polymer-Wasser-Gemisch bildet ein festes Gel und stellt so sicher, dass der Nachwuchs trocken bleibt. ☺

RAUS AUS DER PLASTIK-SACKGASSE

KUNSTSTOFFE SIND LANGLEBIG, ABER HÄUFIG NUR KURZ
IN GEBRAUCH UND LANDEN DANN IN DER UMWELT.
DAMIT BÖDEN UND GEWÄSSER NICHT WEITER VERMÜLLEN,
MUSS PLASTIK LEICHTER ZU RECYCELN SEIN.

A

Als der US-Amerikaner Charles Moore 1997 nach einer Regatta von Hawaii nach Los Angeles segelte, fand er seine Jacht plötzlich umgeben von alten Plastikflaschen, Zahnbürsten, Tüten und anderen Kunststoffteilen. Er hatte den nordpazifischen Müllteppich entdeckt, der inzwischen eine Meeresfläche bedeckt, die mehr als viermal so groß wie Deutschland ist.

Seit den 1960er Jahren hat sich die globale Kunststoffproduktion verzwanzigfacht. 2018 wurden weltweit knapp 360 Millionen Tonnen Plastik hergestellt, dazu mehr als 60 Millionen Tonnen synthetischer Fasern. Eine Folge dieses Booms: Immer mehr Plastik häuft sich in der Umwelt an, in Böden, Seen, Flüssen und vor allem im Ozean. Eine eigentlich nützliche Eigenschaft der meisten Kunststoffe – ihre Widerstandsfähigkeit – wird dabei zum Problem, da ihr Abbau Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauert.

Rund 30 Prozent des weltweit anfallenden Kunststoffmülls, 75 Millionen Tonnen pro Jahr, landen in der Umwelt.

Einen Großteil davon transportieren Flüsse in die Meere. Besonders in Asien, wo die meisten Länder keine oder nur unzureichende Entsorgungssysteme haben – und wohin hoch entwickelte Staaten wie Deutschland ihre Abfälle teilweise verschiffen. Aber auch vom europäischen Festland gelangen jährlich mehrere hunderttausend Tonnen Plastik in die angrenzenden Küstengewässer. Zu den häufigsten Abfällen an Europas Stränden gehören Plastikflaschen, Chipstüten und Luftballons.

VOM ACKERBODEN BIS IN DIE TIEFSEE

Schätzungsweise 150 Millionen Tonnen Kunststoffmüll treiben heute bereits im Ozean, und jede Minute kommt etwa eine Lkw-Ladung hinzu.

Plastikabfälle in der Umwelt sind nicht nur ein ästhetisches Ärgernis. Vor allem in den Meeren stellen sie für viele Tiere eine tödliche Gefahr dar: Schildkröten, Delfine und Seevögel verschlucken Kunststoffteile und sterben mit verstopftem

Magen-Darm-Trakt, oder sie verheddern sich in ring- und schnurartigem Müll. Auch Korallenriffe leiden vielerorts unter der Plastikverschmutzung. Den Verlust an Naturkapital im Ozean beziffert das Umweltprogramm der Vereinten Nationen auf rund zwölf Milliarden Euro pro Jahr.

Neben größeren Müllteilen sammelt sich in Böden und Gewässern immer mehr Mikroplastik an. Das sind Fragmente, die maximal fünf Millimeter messen. Im Fokus der öffentlichen Debatte stehen meist Zusätze in Produkten wie Kosmetika und Waschmitteln. Diese stellen jedoch eine vergleichsweise kleine Quelle für Mikroplastik dar und wurden inzwischen aus vielen Produkten verbannt. Wesentlich öfter findet man in der Umwelt unter anderem Kunststoffgranulat, aus dem Plastikwaren hergestellt werden. Der Hauptanteil entfällt allerdings auf Mikroplastik, das erst durch Fragmentierung größerer Teile entsteht.

Erhebliche Mengen an Mikroplastik entstehen etwa beim Waschen von Textilien aus Kunstfasern und durch die



MIKROPLASTIK IST BIS ZU FÜNF MILLIMETER GROB – UND INZWISCHEN IN DEN ENTLEGENSTEN WINKELN DER ERDE ZU FINDEN. DIE TEILCHEN ENTSTEHEN ZUM BEISPIEL AUS VERPACKUNGSMÜLL, BEIM WASCHEN VON KUNSTFASERN ODER DURCH REIFENABRIEB.

DOTTEDHIPPO / GETTY IMAGES / IStock

Abnutzung von Autoreifen. In der modernen Landwirtschaft wachsen Erdbeeren, Salat oder Spargel häufig unter Mulchfolien aus Polyethylen, die nach der Ernte teils untergepflügt werden und im Ackerboden allmählich zerfallen. Auch Deponien, auf denen 30 Prozent des weltweiten Plastikabfalls landen, sind eine Quelle für Mikroplastik. Im Ozean gesellt sich zu dem durch Flüsse eingetragenen Mikroplastik jenes, das Wind und Wellen durch Zerreiben von Müllteilen produzieren.

Und es erreicht selbst die entlegensten Winkel. So haben Wissenschaftler

Mikroplastik im arktischen Meereis ebenso wie in Tiefseesedimenten nachweisen können. Die winzigen Teilchen reichern sich in Fischen und Muscheln an, die möglicherweise auf unseren Tellern landen. Problematisch sind nicht nur die Kunststoffe selbst, sondern auch die darin enthaltenen Additive wie Farbstoffe oder Weichmacher sowie andere potenziell giftige Substanzen, die ins Meer gelangen und die Mikroplastik magisch anzieht.

Die wachsende Weltbevölkerung und das Streben nach Wohlstand werden die

Nachfrage nach Kunststoffen unweigerlich weiter ansteigen lassen. Prognosen zufolge könnte sich die globale Produktion in den nächsten 20 Jahren noch einmal verdoppeln, das Müllaufkommen weiter zunehmen. Um zu verhindern, dass zukünftig mehr Plastik in den Meeren schwimmt als Fisch, gilt es daher zum einen, unnötigen Plastikverbrauch zu vermeiden und Müllquellen zu minimieren.

Erhebliches Potenzial zur Müllvermeidung bieten vor allem kurzlebige Einwegprodukte wie Verpackungen. Diese machen rund ein Viertel des weltweiten

GROBE MENGEN PLASTIKMÜLL LANDEN IM OZEAN UND WERDEN DORT ZUR TÖDLICHEN GEFAHR: SEEVÖGEL WIE DIESER BASSTÖLPEL ETWA BAUEN NESTER AUS KUNSTFASERN. DARIN VERHEDDERT SICH DER NACHWUCHS.



THOMAS SCHNITZLER / STOCK.ADOBE.COM

Kunststoffverbrauchs aus und etwa die Hälfte der Abfälle im Ozean. Allein in Deutschland fallen pro Kopf jährlich rund 38 Kilogramm Verpackungsmüll an. Sie sind die Folge eines Convenience-Lifestyles mit Coffee-to-go, verzehrfertigen Salaten im Supermarkt sowie Currys oder Sushi per Lieferservice.

Die Europäische Union hat im Rahmen ihrer Kunststoffstrategie ein ab 2021 geltendes Verbot von Einwegartikeln wie Strohhalmen oder Wegwerfbesteck beschlossen. Plastiktüten, Symbol des globalen Plastikproblems, sind in zahlreichen Ländern inzwischen verboten oder dürfen nicht mehr kostenlos abgegeben werden. Unverpackt-Läden, in denen Käufer ihre Waren in mitgebrachte Behälter abfüllen, sind ein weiteres Beispiel für Ansätze, das Müllaufkommen einzudämmen (wenngleich diese Läden bisher lediglich eine Nische für einkommensstarke Konsumenten besetzen).

In vielen Bereichen sind Kunststoffe auf Grund ihrer Funktionalität jedoch schlicht unverzichtbar oder haben deutliche Vorteile gegenüber anderen Materialien. So halten Kunststoffe

Lebensmittel länger frisch und sichern die Hygiene in Krankenhäusern. Sie helfen, das Gewicht von Autos und Flugzeugen und damit den Kraftstoffverbrauch zu senken. Unsere moderne Kommunikation via Smartphone und Computer wäre ohne Plastik undenkbar.

KREISLAUFWIRTSCHAFT STATT LINEARER STOFFSTRÖME

Um die Einträge von Kunststoffabfällen in die Umwelt zu verringern, ist es daher zum anderen notwendig, weltweit Recyclingquoten drastisch zu steigern. Das bedeutet nicht nur Entsorgungssysteme auf- beziehungsweise auszubauen, sondern darüber hinaus, effiziente Sortierverfahren zu entwickeln und Kunststoffe derart zu designen, dass sie recycelfähig sind. Polymergemische und Produkte aus verschiedenen und oft verklebten Kunststoffen erschweren die Wiederverwertung oder resultieren in minderwertigen Rezyklaten (so genanntes Downcycling). Auch deshalb endet heute gut die Hälfte des weltweit erzeugten Plastikmülls auf Deponien und in Verbrennungsanlagen.

Wissenschaftler suchen nach Lösungen, wie sich Kunststoffe leichter trennen und mehrfach zu neuen Flaschen, Fasern oder Folien verarbeiten lassen. Ziel ist es, lineare Stoffströme in eine Kreislaufwirtschaft zu verwandeln, in der Plastik als wertvoller Rohstoff betrachtet wird. Polymere nicht stets aus fossilen Rohstoffen neu zu synthetisieren, würde zudem die CO₂-Bilanz der globalen Kunststoffproduktion verbessern, die immerhin sechs Prozent des weltweit geförderten Öls verschlingt.

Ein großes Problem beim Recycling von Plastik sind Verunreinigungen durch Fremdkunststoffe. Es reichen beispielsweise Spuren von Polyvinylchlorid (PVC) aus, einem oft für Verpackungen verwendeten Polymer, um recyceltes Polyethylen-terephthalat (PET) praktisch unbrauchbar zu machen. PVC bildet Säuren, die PET brüchig und gelblich werden lassen. Auch andere Kunststoffe genügen nach dem Recyclingprozess häufig nicht mehr den mechanischen oder optischen Ansprüchen.

Grund für Verunreinigungen ist unter anderem, dass Sortieranlagen Kunststoffe

nicht immer gut unterscheiden können, etwa zwischen PVC- und PET-Flaschen oder zwischen Polyethylen (PE) hoher und niedriger Dichte. Forscher haben dafür eine Lösung gefunden: unsichtbare Fluoreszenz-Marker, die man auf Verpackungen druckt. Die Marker können unter UV-Licht maschinell gelesen werden und verraten der Anlage, um welche Sorte Plastik es sich jeweils handelt.

Eine weitere Herausforderung ist das Trennen von Kunststoffen, die miteinander verschweißt oder verklebt sind. Viele Verpackungen bestehen aus mehreren Plastikschichten und eignen sich daher nicht für ein mechanisches Recycling. Die Firma APK in Merseburg, Sachsen-Anhalt, hat ein Verfahren etabliert, bei dem PE mit Hilfe eines wiederverwendbaren Lösungsmittels aus mehrlagigen Verpackungen gewonnen wird – in einer

Qualität, die vergleichbar ist mit neuem PE-Granulat.

Am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) haben sich Forscher überlegt, wie Handys und andere Elektronikgeräte leichter repariert und recycelt werden können. Herausgekommen ist dabei ein reversibler Kleber: Dieser ist bei Raumtemperatur stabil, löst sich aber durch Erwärmen punktgenau. Die KIT-Forscher haben dafür Sollbruchstellen in die Polymerketten eingebaut, die sich je nach gewünschter Ablösetemperatur des Klebers modifizieren lassen.

RETTUNG BIOPLASTIK?


Und auch Biotechnologie könnte helfen, Kunststoffe zukünftig in größerem Maßstab wiederzuverwerten. So haben französische Forscher jüngst ein Enzym beschrieben, das mit hoher Effizienz PET in dessen Bausteine – die Monomere –

zerlegt. Diese eignen sich wieder für die Herstellung hochwertiger Polymere, die man sonst aus Erdöl synthetisieren würde.

Die Beispiele zeigen, dass der Lebenszyklus von Kunststoffen keine Einbahnstraße sein muss, die auf der Müllhalde, in der Verbrennung oder schlimmstenfalls in der Umwelt endet. Zugleich ist ein Szenario, in dem überhaupt kein Plastik in Böden und Gewässer gelangt, wenig realistisch. Selbst wenn es gelänge, diesen Müllanteil von heute 30 auf ein Prozent zu senken, wären das immer noch mehr als zwei Millionen Tonnen Abfall, die sich jährlich in der Umwelt anhäufen. Um zu verhindern, dass diese dort Jahrzehnte überdauern, sollen deshalb zukünftig vermehrt Kunststoffe eingesetzt werden, die Mikroorganismen verdauen können.

Biologisch abbaubare Kunststoffe finden insbesondere bei Verpackungen oder Ackerfolien zunehmend Verwendung. Sie können sowohl aus nachwachsenden Rohstoffen etwa aus Zuckerrohr oder Mais bestehen (biobasierte Kunststoffe) als auch erdölbasiert sein.

Allerdings werden als kompostierbar verkaufte Folien, Mülltüten oder To-go-Becher häufig nur unter bestimmten Bedingungen effektiv abgebaut, und eine vollständige Kompostierung in der freien Natur kann Monate oder Jahre dauern. Das gilt zum Beispiel für Produkte aus Polymilchsäure, die rund 25 Prozent aller biologisch abbaubaren Kunststoffe ausmachen. Auch gibt es bislang keinen marktfähigen Kunststoff, der in Meerwasser schnell verrottet.

Das Problem der Umweltbelastung durch Plastikabfälle zu lösen, ist eine große Herausforderung. Während sich Punktquellen wie synthetische Mikrofasern aus Waschmaschinen durch den Einbau von Filtern vergleichsweise leicht beseitigen ließen, sind diffuse Umwelteinträge, etwa durch Reifenabrieb, schwieriger zu verhindern. Mehr Recycling und Biokunststoffe allein werden am Ende nicht ausreichen. Ebenso notwendig ist es, weniger Plastik zu verbrauchen – und verschiedene Transportmittel intelligent zu kombinieren. 



VOR ALLEM IN ÄRMEREN LÄNDERN
WERDEN ABFÄLLE OFT IN DER
LANDSCHAFT ENTSORGT – WEIL DAS
ÖKOLOGISCHE BEWUSSTSEIN
UND ADÄQUATE RECYCLINGSYSTEME
FEHLEN.

STOFFE, AUS DENEN DIE ZUKUNFT GEMACHT WIRD

KUNSTSTOFFE HABEN OFT EINEN SCHLECHTEN RUF.
ZU UNRECHT. AUF IHNEN BASIEREN VIELE DIGITALE UND
NACHHALTIGE TECHNOLOGIEN.

Wenn Plastik es in die Medien schafft, dann vor allem mit negativen Schlagzeilen. Doch trotz aller Probleme in Sachen Recycling und Umweltbelastung: Ohne Kunststoffe wäre unser heutiges, modernes Leben kaum denkbar. Und auch die großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts – die klimafreundliche Verkehrs- und Energiewende sowie die Digitalisierung – sind ohne polymere Werkstoffe wohl nicht zu bewältigen. Ihre Vorteile liegen auf der Hand: Es existiert eine beachtliche Bandbreite an Polymeren, die die verschiedensten nützlichen Eigenschaften mitbringen. Manche leiten geladene Teilchen (Ionen und Elektronen), andere lassen sich verbiegen oder härten zu einem porösen Schaum aus.

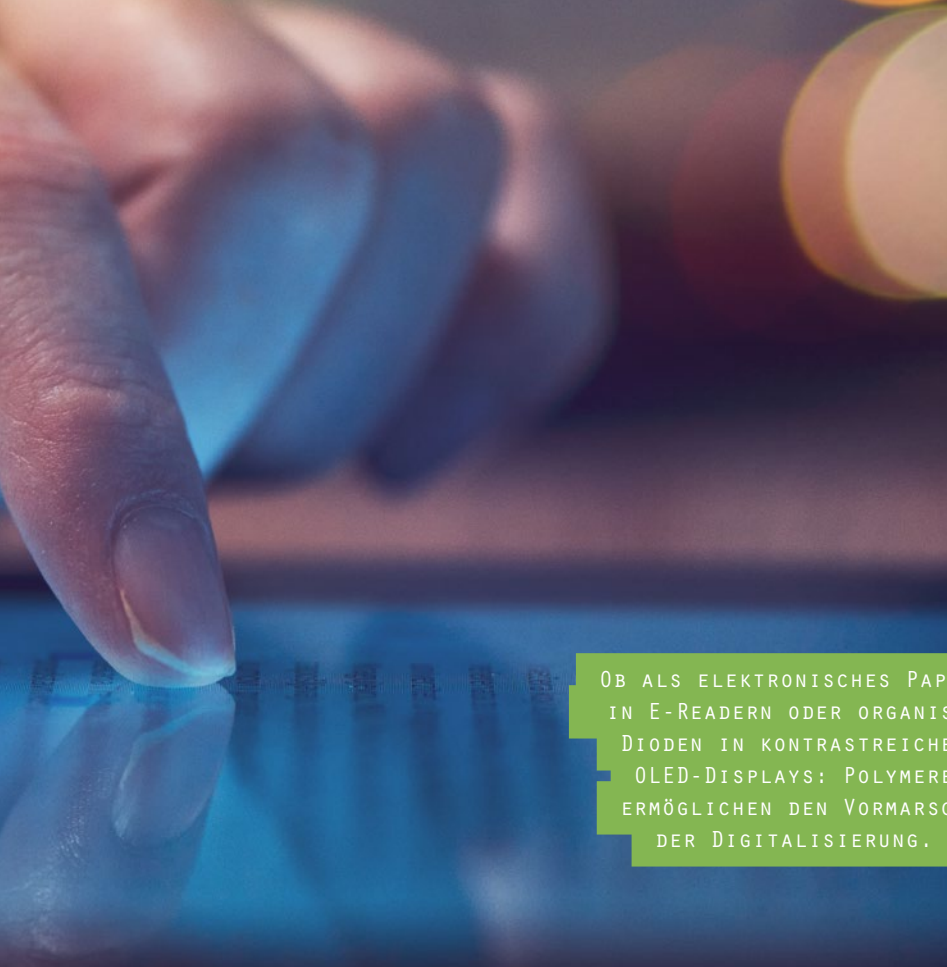
Ein immer wichtigeres Anwendungsgebiet synthetischer Polymere sind Akkumulatoren, kurz Akkus. Sie stecken in Elektrofahrzeugen, Smartphones und Laptops. Entlädt man einen Akku, setzt die Anode (Minuspol) in einer chemischen Reaktion Elektronen und Ionen frei, die über einen äußeren Stromkreis

beziehungsweise über einen Elektrolyten zur Kathode (Pluspol) wandern und dort reagieren. Chemisch gespeicherte Energie wird so in Strom umgewandelt. Beim Aufladen kehrt sich dieser Prozess um. Zahlreiche Bestandteile von Akkus bestehen schon heute aus Polymeren. Viele Hersteller verwenden zum Beispiel mikroporöse Polymerfolien als Trennmateriale zwischen den Elektroden, um Kurzschlüsse zu verhindern. Außerdem ummantelt man Batterien und Akkus gerne mit Kunststoffen, weil diese gegenüber Druckänderungen toleranter sind als Metallhülsen.

Auch als Elektrolyte und sogar als Elektrodenmaterial finden Polymere Verwendung. Sie machen Akkus flexibler und umweltfreundlicher. Ersetzt man etwa die flüssigen Elektrolyte in herkömmlichen Lithium-Ionen-Akkus mit gelartigen Polymeren, lassen sich sehr flache Akkus oder solche mit ungewöhnlichen geometrischen Formen produzieren. Lithium-Polymer-Akkus findet man deshalb besonders häufig in tragbaren

Elektronikgeräten wie Powerbanks, E-Zigaretten und drahtlosen Controllern für Spielkonsolen. Autohersteller bringen inzwischen ebenfalls Elektro- und Hybridfahrzeuge mit Lithium-Polymer-Akkus auf die Straße. Die Akkus der Leihwagenflotten der Firma Bolloré, die derzeit in verschiedenen Städten in den USA, Großbritannien, Frankreich sowie in Singapur unterwegs sind, enthalten etwa einen Elektrolyten aus Polyethylenglykol.

KUNSTSTOFF STATT METALL
Neben alternativen Elektrolyten ist auch ein Ersatz des Kathodenmaterials in Lithium-Ionen-Akkus erstrebenswert. Denn dieses enthält meist Kobalt und Nickel – zwei begrenzte Ressourcen, deren Abbau aus Umwelt- und Menschenrechtsperspektive mitunter problematisch ist. Hinzu kommt, dass sich die Metalle aus entsorgten Akkus nur schwer zurückgewinnen lassen. In den vergangenen Jahren sind deshalb Elektroden auf der Basis von Polymeren verstärkt in den



STEVANOVICIGOR / GETTY IMAGES / ISTOCK

OB ALS ELEKTRONISCHES PAPIER IN E-READERN ODER ORGANISCHE DIODEN IN KONTRASTREICHEN OLED-DISPLAYS: POLYMERE ERMÖGLICHEN DEN VORMARSCH DER DIGITALISIERUNG.

Fokus der Batterieforschung gerückt. Bestimmte Polymere – darunter Polysulfide, Polyimine, Polyazo-Moleküle und polymere Radikale – können Anionen oder Kationen einlagern und so elektrische Ladung speichern. Diese reichen jedoch bislang nicht an die Energiedichten von anorganischen Kathodenmaterialien heran. Darüber hinaus ist die Herstellung der Polymere sehr teuer, weshalb noch keine Akkus mit Polymer-electroden auf dem Markt sind.

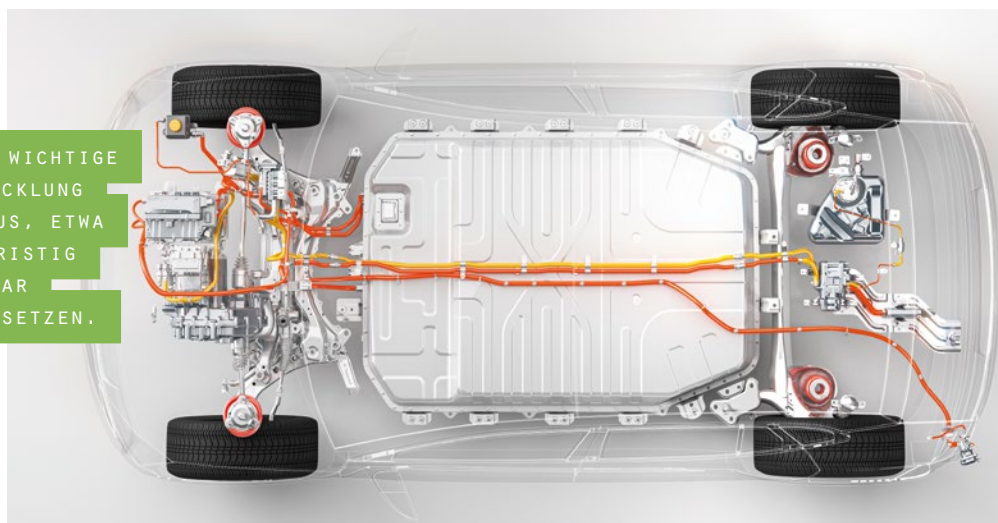
Manche Forscher träumen davon, dass man zukünftig in der Lage sein wird, Akkus herzustellen, die vollständig aus Polymeren bestehen – von der Hülle über den Elektrolyten bis hin zu den Elektroden. Solche Akkus könnten umweltschonender entsorgt werden als die heute verbauten. Bei einer thermischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen würden keine oder zumindest weniger toxische Gase entstehen. Und auch ein Recycling wäre denkbar.

Für die Verkehrswende spielt nicht nur die Entwicklung leistungsstarker Akkus eine Rolle. Brennstoffzellen bieten eine weitere umweltfreundliche Alternative zu klassischen Verbrennungsmotoren. Sie wandeln gespeicherte chemische Energie in elektrische um, ohne dabei Treibhausgase zu produzieren. Wie Batterien bestehen sie aus einer galvanischen Zelle. Die meisten Automobilhersteller, darunter Marktführer Hyundai und Toyota, verwenden eine Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle, kurz PEMFC, also einen Brennstoffzellentyp mit einem Polymer als Elektrolyten. An der Anode einer PEMFC spaltet ein Katalysator den Brennstoff Wasserstoffgas (H_2) in Protonen (H^+) und Elektronen (e^-). Die Protonen wandern durch den Polymer-elektrolyten zur Kathode, wo sie mit Luftsauerstoff (O_2) zu Wasser (H_2O) reagieren, das einfach über den Auspuff ausgestoßen wird. Als Elektrolyt dient meistens so genanntes Nafion™ – eine Modifikation des Teflons® –, das Protonen und Kationen, jedoch keine Anionen passieren lässt.

Weil Wasserstoffgas bei Luftkontakt explosiv und damit aufwändig zu lagern und zu transportieren ist, entwickeln Forscher auch PEMFCs mit Methanol als Brennstoff. Allerdings sind diese nur für Betriebstemperaturen von bis zu 100 Grad Celsius geeignet, dazu anfällig für Verunreinigungen des Brennstoffs und bislang recht teuer. Hier besteht also noch Optimierungsbedarf.

SVEN LOEFFLER / GETTY IMAGES / ISTOCK

POLYMERE SPIELEN EINE WICHTIGE ROLLE BEI DER ENTWICKLUNG LEISTUNGSFÄHIGER AKKUS, ETWA FÜR E-AUTOS. LANGFRISTIG KÖNNTEN SIE Sogar ELEKTRODENMETALLE ERSETZEN.





LEICHT, DÜNN UND FLEXIBEL:
SOLARZELLEN AUS
HALBLEITENDEN POLYMEREN
KÖNNTEN ZUKÜNFTIG
AN FASSADEN ODER FENSTERN
STROM ERZEUGEN.

Eine andere Möglichkeit, Energie nachhaltig zu gewinnen, bieten Solarzellen: halbleitende Materialien, die Photonen des Sonnenlichts absorbieren. Dadurch werden Elektronen frei, die durch die Zelle zu einer Elektrode wandern – Strom fließt. Der Markt wird derzeit von Solarzellen aus Silizium dominiert, weil sie witterungsbeständig sind und akzeptable Wirkungsgrade erreichen. Der Wirkungsgrad beschreibt, wie effizient die Zelle einfallende Sonnenenergie in Strom umwandelt. Allerdings eignen sich Fotovoltaikanlagen auf Siliziumbasis auf Grund des hohen Gewichts und mangelnder Flexibilität nicht für alle Gebäudeoberflächen oder für mobile Elektronikgeräte. Ihre Herstellung ist zudem energieintensiv und entsprechend teuer.

Organische Solarzellen aus halbleitenden Polymeren könnten diese Probleme womöglich lösen. Weil organische Solarzellen dünner und transparenter sind als jene aus Silizium, hofft man, sie eines Tages auf Häuserfassaden, Fenstern oder

auf Smartphones und Smartwatches anbringen zu können.

Als Strom erzeugende Schicht dient in organischen Solarzellen an Stelle von Silizium ein Polymer, welches Elektronen abgibt, und ein nichtpolymere organisches Molekül, das diese aufnimmt. In den Strukturen beider Materialien wechseln sich Doppel- und Einfachbindungen ab, was dazu führt, dass die Elektronen keinen festen Aufenthaltsort haben, sondern sich über die Moleküle verteilen. Das verleiht diesen halbleitende Eigenschaften. Lange konnten organische Solarzellen nicht mit siliziumbasierten konkurrieren. Durch geschicktes Kombinieren von Polymeren und Nichtpolymeren ist es Forschern jedoch gelungen, die Wirkungsgrade stetig zu erhöhen, auf inzwischen über 17 Prozent. Sie erreichen damit fast die Effizienz von Silizium-Solarzellen. Bis zur Massentauglichkeit organischer Solarzellen müssen allerdings noch einfachere, sprich kostengünstigere Wege gefunden werden, die organischen Komponenten zu synthetisieren.

Andere Polymere im Bereich der organischen Elektronik helfen derweil schon seit mehr als einem Jahrzehnt, Energie zu sparen. Der Einsatz leitfähiger organischer Moleküle ist immer dann interessant, wenn Dinge leicht und mechanisch flexibel sein sollen. Halbleitende Polymere lassen sich in relativ einfachen Verfahren und bei niedrigen Temperaturen großflächig auf dünne Folien aufdrucken. Das ermöglicht eine rentable und Energie sparende Massenfertigung, etwa von Chipkarten. Ein anderes Beispiel sind organische Leuchtdioden (OLEDs), die Strom in Licht umwandeln – also genau auf den umgekehrten Prozess einer Solarzelle setzen. Displays und Fernseher mit OLED-Technologie verbrauchen weniger Energie als die weit verbreiteten Flüssigkristall-Bildschirme (LCDs) – und bieten zugleich einen höheren Kontrast sowie eine bessere Farbdarstellung. OLEDs erlauben es zudem, sehr dünne Bildschirme zu bauen. Als organische Farbstoffe kommen meist Derivate des Poly(p-phenylen-vinyl) (PPV) zum Einsatz.

POLYMERE HELFEN, CO₂ UND ENERGIE ZU SPAREN

Auf Polymeren basiert auch so genanntes elektronisches Papier in Lesegeräten für E-Books. Hinter E-Papier steckt eine Technik, die ein zähflüssiges Polymer mit geladenen weißen Mikropartikeln enthält. Für jedes Pixel sind über und unter der Polymerschicht kleine Elektroden angebracht. Legt man ein elektrisches Feld an, schwimmen die Mikropartikel zur Elektrode mit der entgegengesetzten Ladung. Dadurch erscheint das Pixel entweder schwarz oder weiß. Seit einigen Jahren wird E-Papier auch für Smartwatches, Preisschilder in Supermärkten und Anzeigetafeln verwendet.

Vor allem die Kombination aus elektrischer Leitfähigkeit und mechanischer Flexibilität macht Polymere für zahlreiche Zukunftstechnologien interessant. Bisweilen nutzt man jedoch auch nur die mechanische Vielseitigkeit von

Polymeren. Von Bedeutung ist etwa das Massenprodukt Polyurethan, das aus Diisocyanaten und Diolen hergestellt wird. Indem man das Diol variiert, kann man aus Polyurethan alles von Duroplasten über Thermoplasten bis hin zu Elastomeren herstellen; außerdem Weich- und Hartschäume.

Polyurethan-Schaumstoffe und andere Kunststoffe wie Polymethylmethacrylat oder Polycarbonat ersetzen seit Jahrzehnten viele Metall- und Glaskomponenten in Autos und Flugzeugen. Die leichten Kunststoffe verringern den Kraftstoffverbrauch und damit den CO₂-Ausstoß. Polyurethan-Hartschäume sind auch als Dämmstoff für Gebäude nicht mehr wegzudenken. Zwischen Putz und Mauerwerk verhindern sie, dass Wärme im Winter über die Außenwand an die Umgebung abgegeben wird und dass Hitze im Sommer von außen in die Wohnung dringt. Füllt man ein Dämmgas wie Pentan in die poröse Struktur des Schaumstoffs, kann dieser mehr als das 70-Fache der Energie einsparen, die für dessen Herstellung, Einbau und Entsorgung anfällt. In Passivhäusern erreichen Polyurethan-Schaumstoffe zusammen mit anderen Materialien eine so gute Dämmung, dass die Gebäude ohne Heizung und Klimaanlage auskommen.

Neben Dämmstoffen und Autoteilen sind Matratzen eines der häufigsten Einsatzgebiete von Polyurethan. Für die Herstellung des dafür benötigten Polyurethan-Weichschaums nutzt man Polyether-Polyole, die – wie viele Polymere – auf fossilen Rohstoffen basieren. Forschern ist es gelungen, einen Teil des Ausgangsmaterials durch CO₂ zu ersetzen, das bei der industriellen Ammoniaksynthese als Abfallprodukt anfällt. Über diese so genannte CO₂-Fixierung werden in einer Anlage in Dormagen nun Polyether-Karbonat-Polyole mit einem CO₂-Anteil von bis zu 20 Prozent hergestellt. Die daraus gefertigte klimafreundliche Schaumstoffmatratze gibt es bereits zu kaufen.


Ein viel versprechendes Anwendungsfeld, das sich erst in jüngster Zeit die

Eigenschaften von Polymeren zu Nutze macht, ist die Datenspeicherung. So wie natürlich vorkommende Makromoleküle Informationen speichern – unsere DNA etwa Baupläne für Proteine –, lassen sich auch synthetische Polymere codieren. Zum Speichern eines Binärcodes in einem Molekülstrang müssen zwei verschiedene Monomere als 0-Bit und 1-Bit definiert werden, um daraus ein Polymer mit dem gewünschten Code zu synthetisieren. Mit Hilfe der Massenspektrometrie kann man die so codierten Informationen wieder auslesen.

MOLEKULARER GEHEIMCODE

Wissenschaftler haben es bereits geschafft, 128 Bit an Daten in Polymeren zu verschlüsseln. Obwohl die Forschung hier noch in den Kinderschuhen steckt, ist es denkbar, dass diese Art der Datenspeicherung in Zukunft tatsächlich eingesetzt wird. Zum Beispiel, um Produktpiraterie bei teuren Medizinprodukten aufzudecken. Ein molekularer Barcode könnte etwa anzeigen, ob es sich bei einem Implantat um ein Originalteil handelt oder um ein billiges Imitat. Ein anderes mögliches Anwendungsfeld ist die Kryptografie: Zum Auslesen codierter

Informationen könnte man molekulare Schlüssel verwenden, die auf analogem Weg zum Empfänger transportiert werden.

Diese Beispiele illustrieren: Dank ihrer besonderen strukturellen, mechanischen und physikochemischen Eigenschaften sind Polymere für viele Zukunftstechnologien unverzichtbar. Schon heute sind sie aus zahlreichen Anwendungen nicht mehr wegzudenken. Ob in Brennstoffzellen, OLEDs oder Passivhäusern – Polymere helfen, den Verbrauch fossiler Rohstoffe zu senken, den Ausstoß von gesundheits- und klimaschädlichen Abgasen zu verringern sowie Energie zu sparen. Andere Technologien, die zum Klimaschutz beitragen, werden mit Hilfe von Kunststoffen immer leistungsfähiger. Dazu zählen Solarzellen, die sich als polymere Variante für die unterschiedlichsten Oberflächen eignen, und Polymer-Akkus, die nur aufwändig zu recycelnde und schwermetallbelastete Akkus ersetzen könnten. Auch die Herstellung von Polymeren verbraucht oft weniger Energie als die von anorganischen Materialien und könnte in Zukunft vermehrt auf die Fixierung von CO₂ aus Industrieprozessen setzen. 

IN MODERNEN PASSIVHÄUSERN
HELFE DÄMMSTOFFE AUS
POLYSTYROL ODER POLYURETHAN,
WÄRMEVERLUSTE UND
DAMIT DIE HEIZKOSTEN ZU
MINIMIEREN.

AH_FOTOBOX / GETTY IMAGES /
ISTOCK



MIT DEM NANOTAXI IN DIE ZELLE

DIE ARBEITSGRUPPE VON ANJA TRÄGER
ENTWICKELT POLYMERE NANOTRANSPORTER
FÜR DIE GENTHERAPIE.

MIT FRDL. GEN. VON ANJA

ANJA TRÄGER

Die Biotechnologin
forscht am
Jena Center for Soft
Matter (JCSM).

Frau Träger, Sie und Ihr Team entwickeln Gen-Taxis. Was versteht man darunter?

Gen-Taxis sind winzige Strukturen, die genetisches Material in Zellen einschleusen können. Als Taxi kann zum Beispiel ein Virus dienen. Wir nutzen dafür jedoch Polymere. Diese legen sich wie eine schützende Hülle um den Fahrgast, das Genmaterial. Mit Hilfe von Gen-Taxis lässt sich das Erbgut von Zellen verändern, sie können neue Funktionen einbringen oder bestehende ausschalten.

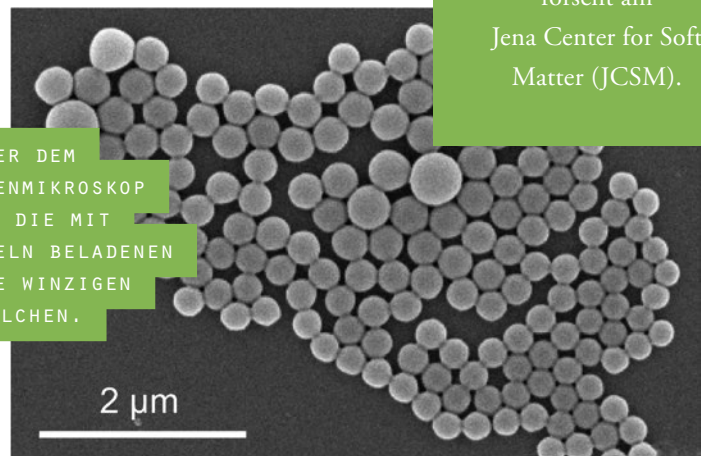
Wie sehen Ihre Taxis aus?

Man kann sie sich als winzige Kugeln vorstellen, manche sind eher wurmartig. Sie bestehen aus bis zu mehreren tausend Polymeren mit einem Durchmesser um die 100 Nanometer. Das ist etwa 500-mal dünner als ein menschliches Haar.

Wie gelangen die Genschnipsel in so einen Nanotransporter?

Die genetischen Informationen sind in Nukleinsäuren, also DNA oder RNA gespeichert. Diese Biomoleküle besitzen verschiedene chemische Gruppen. Wir nutzen einen negativ geladenen Abschnitt, die Phosphatgruppe, um die Nukleinsäure an unsere positiv geladenen Polymere zu binden. Außerdem fügen wir weitere Gruppen mit zusätzlichen chemischen Eigenschaften hinzu, die

UNTER DEM
ELEKTRONENMIKROSKOP
ÄHNELN DIE MIT
GENSCHNIPSELN BELADENEN
POLYMERE WINZIGEN
KÜGELCHEN.



JENA CENTER FOR SOFT
MATTER

die Transporter vor dem Immunsystem tarnen. Sie würden sonst vor Erreichen des Ziels beseitigt. In die einzelnen Polymere können wir zudem Sequenzen einbauen, die es dem Körper erleichtern, die Gen-Taxis nach ihrer »Fahrt« abzubauen.

Könnten die Taxis auch andere Fracht transportieren?


Im Prinzip ja. Zum Beispiel werden sie oft genutzt, um klassische Wirkstoffe zu transportieren, die nur in ganz bestimmte Zellen gelangen sollen, oder solche, die der Körper andernfalls schlecht aufnehmen würde.

Wie finden die Polymere ans Ziel?

Das ist tatsächlich eine große Herausforderung. Die Nanotransporter dürfen die genetischen Informationen nicht wahllos in alle Zellen einschleusen. Wir statten

unsere Gen-Taxis daher mit Zieleinheiten aus. Das sind Moleküle, die ausschließlich von bestimmten Zellen erkannt werden, nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip.

Was sollen Ihre Gen-Taxis zukünftig leisten können?

Unser Ziel ist es, effiziente, gut verträgliche und stabile Nanotransporter herzustellen, um damit Krankheiten zu behandeln. Sie könnten unter anderem beschädigte Zellen reparieren oder das Immunsystem unterstützen. Ein aktuelles Beispiel ist etwa die Entwicklung von RNA-basierten Impfungen, die man auch im Kampf gegen Covid-19 nutzen will. Die RNA eines solchen Impfstoffs enthält Informationen, die die körpereigene Immunabwehr auf den Kampf gegen den Erreger vorbereitet. Dazu muss die RNA in unsere Immunzellen eingeschleust werden. Hier könnten Gen-Taxis helfen. 

LINKS

FACHGRUPPE MAKROMOLEKULARE CHEMIE DER GDCh

[HTTPS://MACROCHEM.ORG](https://macrochem.org)

FASZINATION MAKROMOLEKULARE CHEMIE

[HTTPS://FASZINATIONCHEMIE.DE/MAKROMOLEKULARE-CHEMIE/](https://faszinationchemie.de/makromolekulare-chemie/)

GRUNDLAGEN ZU POLYMEREN UND KUNSTSTOFF

[HTTPS://WWW.UMSICHT.FRAUNHOFER.DE/DE/UEBER-FRAUNHOFER-UMSICHT/NACHHALTIGKEIT/NATIONALE-INFORMATIONSTELLE-NACHHALTIGE-KUNSTSTOFFE/POLYMER-KUNSTSTOFF/GRUNDLAGEN.HTML](https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/ueber-fraunhofer-umsicht/nachhaltigkeit/nationale-informationsstelle-nachhaltige-kunststoffe/polymer-kunststoff/grundlagen.html)

EUROPEAN TYRE AND RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION

[HTTPS://WWW.ETRMA.ORG](https://www.etrma.org)

POLYMERFORSCHUNG IN DEUTSCHLAND

[HTTPS://MACROCHEM.ORG/POSITIONSPAPIER](https://macrochem.org/positionspapier)

DEUTSCHES KUNSTSTOFFMUSEUM

[HTTP://WWW.DEUTSCHES-KUNSTSTOFF-MUSEUM.DE](http://www.deutsches-kunststoff-museum.de)

DAS LEBEN DES HERMANN STAUDINGER

[HTTPS://WWW.K-ONLINE.DE/DE/NEWS/THEMA_DES_MONATS/THEMA_DES_MONATS_-_ARCHIV/DEZEMBER_2019_DAS_LEBEN_DES_HERMANN_STAUDINGER/DAS_LEBEN_DES_HERMANN_STAUDINGER](https://www.k-online.de/de/news/thema_des_monats/thema_des_monats_-_archiv/dezember_2019_das_leben_des_hermann_staudinger/das_leben_des_hermann_staudinger)

PLASTIKATLAS

[HTTPS://WWW.BOELL.DE/DE/PLASTIKATLAS](https://www.boell.de/de/plastikatlas)

PLASTIK IN GEWÄSSERN

[HTTPS://THEMENSPEZIAL.ESKP.DE/PLASTIK-IN-GEWAESSERTN/INHALT-9379/](https://themenspezial.eskp.de/plastik-in-gewaessern/inhalt-9379/)

THE CHEMISTRY OF BIODEGRADABLE PLASTICS

[HTTPS://WWW.COMPOUNDCHEM.COM/2019/06/26/BIODEGRADABLE-PLASTICS/](https://www.compoundchem.com/2019/06/26/biodegradable-plastics/)

END PLASTIC WASTE

[HTTPS://ENDPLASTICWASTE.ORG](https://endplasticwaste.org)

THE NEW PLASTICS ECONOMY

[HTTPS://WWW.ELLENMACARTHURFOUNDATION.ORG/ASSETS/DOWNLOADS/THE-NEW-PLASTICS-ECONOMY-RETHINKING-THE-FUTURE-OF-PLASTICS.PDF](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics.pdf)

SCIENCE TO ENABLE SUSTAINABLE PLASTICS

[HTTPS://WWW.GDCH.DE/FILEADMIN/DOWNLOADS/PUBLIKATIONEN/WEITERE_PUBLIKATIONEN/PDF/SUSTAINABILITY_CS3_WHITEPAPER2020.PDF](https://www.gdch.de/fileadmin/downloads/publikationen/weitere_publikationen/pdf/sustainability_cs3_whitepaper2020.pdf)

BÜCHER

DIETRICH BRAUN

KLEINE
GESCHICHTE
DER
KUNSTSTOFFE

2013, Hanser

308 Seiten

€ 30,-



GEORG SCHWEDT

EXPERIMENTE
RUND UM DIE
KUNSTSTOFFE
DES ALLTAGS

2013, Wiley-VCH

168 Seiten

€ 29,90



MARK MIODOWNIK

WUNDERSTOFFE:
ZEHN
MATERIALIEN,
DIE UNSERE
ZIVILISATION
AUSMACHEN

2016, DVA

304 Seiten

€ 19,99



GDCh-FACHGRUPPE
HOCHSCHULFÜHRER
MAKROMOLEKULARE
CHEMIE 2018

2018, GDCh

288 Seiten

€ 39,90



THISBE LINDHORST
ET AL. (HG.)

UNENDLICHE
WEITEN: KREUZ
UND QUER
DURCHS CHEMIE-
UNIVERSUM

2017, Wiley-VCH

230 Seiten

€ 29,90





GESELLSCHAFT
DEUTSCHER CHEMIKER

IMPRESSUM

HERAUSGEBER: GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER E.V.
VARRENTRAPPSTRASSE 40-42, 60486 FRANKFURT/MAIN
PROJEKTKOORDINATION: DR. KARIN J. SCHMITZ,
DR. THOMAS FRÜH

EINE PUBLIKATION VON: SPEKTRUM CP
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT VERLAGSGESELLSCHAFT MBH
TIERGARTENSTRASSE 15-17, 69121 HEIDELBERG
WWW.SPEKTRUM-CP.DE

LEITUNG: ANN-KRISTIN EBERT, HANNA HILLERT
REDAKTION: DR. TIM KALVELAGE
TEXTE: DR. JANOSCH DEEG, DR. ANNA CLEMENS,
DR. STEFANIE UHRIG
LAYOUT: OLIVER GABRIEL,
KARSTEN KRAMARCZIK
SCHLUSSREDAKTION: CHRISTINA MEYBERG
BILDREDAKTION: GABRIELA RABE
HERSTELLUNG: NATALIE SCHÄFER