

Spektrum

der Wissenschaft

Revolution in der Mikroskopie

Wie sich Moleküle in
Echtzeit beobachten lassen

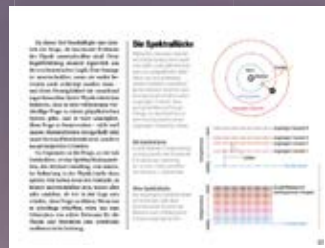
SCHWARZES LOCH **Der Gigant im Zentrum der Milchstraße**
MASSENAUSSTERBEN **Toxische Algenblüten nach Klimaerwärmung**
AQUAKULTUREN **Nachhaltige Fisch- und Muschelfarmen**

Spektrum der Wissenschaft **KOMPAKT**

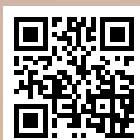


Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum** KOMPAKT-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download, optimiert für Tablets, zur Verfügung.

Wählen Sie unter mehr als 400 verschiedenen Ausgaben und Themen. **Jetzt neu:** Beim Kauf von vier Kompakt-PDFs erhalten Sie ein fünftes Kompakt-PDF gratis.



Ausgewählte **Spektrum** KOMPAKT gibt es auch im Printformat!



Hier bestellen:

E-Mail: service@spektrum.de

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



Daniel Lingenhöhl
 Chefredakteur
 lingenhoehl@spektrum.de

Algenblüten und Schwarze Löcher

Ende letzten Jahres mussten wir leider wegen der gestiegenen Preise für Papier und Energie anfangen, einen Teil jeder Ausgabe von »Spektrum der Wissenschaft« ins Internet auf »Spektrum.de« zu verlagern. In diesem Zusammenhang hatte ich Sie gebeten, mir Ihre Meinung dazu zu schreiben. Und von

dem Angebot haben viele von Ihnen Gebrauch gemacht. Erwartungsgemäß gab es Kritik, wir haben aber auch Verständnis und Zustimmung bekommen. Manche schickten Verbesserungsvorschläge, andere Zuschriften halfen uns, die Zugänglichkeit zu den Artikeln zu erleichtern.

Die Artikel veröffentlichen wir weiterhin unter »Spektrum Plus« (www.spektrum.de/plus/). Für die folgende Ausgabe kann ich nun aber bereits ankündigen, dass wir einen Ihrer Vorschläge umsetzen werden: Wenn Sie ein Digital- oder Kombi-Abonnement haben, finden Sie ab Heft 3.23 die ausgelagerten Artikel auch in Ihrem PDF-Magazin. Gerne können Sie mir weiterhin Ihre Meinung unter redaktion@spektrum.de schreiben.

Abgesehen davon ist diese Ausgabe von »Spektrum der Wissenschaft« wieder gut gefüllt mit spannenden Einblicken in die Forschung. Unsere Serie zu den »Schwarzen Löchern« endet mit einem der wissenschaftlichen Höhepunkte des Jahres 2022: dem ersten Bild des Schwarzen

Lochs in unserer Milchstraße. Der Artikel ab S. 64 erklärt die Hintergründe dazu, wie die spektakuläre Aufnahme zu Stande kam.

Als Geowissenschaftler wiederum reizt mich persönlich immer der Blick zurück in die Erdgeschichte, der uns in diesem Heft in das Perm führt (S. 36). Am Ende jenes Zeitalters fand eines der dramatischsten Massenaussterben statt, das einen großen Teil der damaligen Arten auslöschte. Ausgelöst wurde es durch einen drastischen Klimawandel, der ausgedehnte Todeszonen in Meeren und Seen schuf. Auch heute machen Erderwärmung und toxische Algenblüten den Ozeanen zu schaffen. Deshalb wird es Zeit für uns, die Zeichen der Vergangenheit zu erkennen und endlich unsere Umwelt besser zu behandeln.

Herzlich Ihr

In dieser Ausgabe



Chris Mays, Vivi Vajda, Stephen McLoughlin

Die Paläontologen zeigen: Am Ende des Perms erstickten giftige Planktonblüten das Leben im Wasser. Etwas Ähnliches könnte auch uns bevorstehen (ab S. 36).



Stefan W. Hell

Der Nobelpreisträger treibt die Fluoreszenzmikroskopie auf die Spitze: Er verfolgt nanometerkleine Molekülbewegungen in Echtzeit (Artikel zum Thema S. 12; Interview mit Hell online).

3 EDITORIAL

6 SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

24 **Ökosystem Tumor**

Krebsgeschwulste bestehen aus diversen Zelltypen.

27 **Hochtemperatursupra-
leitung unter der Lupe**

Ein Experiment bestätigt eine 35 Jahre alte Theorie.

30 **Der Beginn der
Warmblütigkeit**

Entscheidender Evolutions-
schritt der Wirbeltiere.

32 **Gleichtakt über
Rekorddistanz**

Optische Atomuhren lassen
sich per Laser koppeln.

33 IMPRESSUM

SPRINGERS EINWÜRFE

34 **Überlebenskünstler**

Bakterien sind gemeinsam
stark.

57 IM BILD

80 LESERBRIEFE

FREISTETTERS FORMELWELT

81 **Unendlichkeiten**

Manchmal lohnt sich ein
Blick abseits der Primzahlen.

82 VORSCHAU

Unter spektrum.de/plus/
finden Sie folgende Artikel:

TITELTHEMA

Interview mit Stefan Hell

SCHLICHTING!

Der perfekte Dominoeffekt

REZENSIONEN

FUTUR III – KURZGESCHICHTE

TITELTHEMA

12 **Die letzte Grenze**

Dank einer bahnbrechenden Technik lassen sich im Fluoreszenzmikroskop lebende Strukturen auf den Nanometer genau auflösen und Proteinbewegungen im Millisekundentakt verfolgen. Von Verena Tang

EVOLUTION

36 **Die Herrschaft des Schleims**

Während des katastrophalen Massenaussterbens am Ende des Perms erstickten Bakterien und Algen das übrige Leben in den Gewässern. Ähnliches könnte auch uns bald bevorstehen.

Von Chris Mays, Vivi Vajda und Stephen McLoughlin

MEERESFRÜCHTE

44 **Fischerei im Umbruch**

SERIE: NACHHALTIGE ERNÄHRUNG (TEIL 3) Neue Zuchtmethoden sollen mehr Fische und Meeresfrüchte auf unsere Teller bringen – und Tiere wie Ökosysteme schonen. Von Ellen Ruppel Shell

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

58 **Prodrugs – maskierte Wirkstoffmoleküle**

Manche Medikamente erreichen ihr Ziel nur mit einer Art Tarnung, die am Wirkort abgespalten wird. Von Matthias Ducci und Marco Oetken

SERIE: SCHWARZE LÖCHER (TEIL 3)

RADIOASTRONOMIE

64 **Der dunkle Kern der Milchstraße**

Beobachtungen des supermassereichen Schwarzen Lochs in unserer Galaxis werden helfen, solche extremen Objekte besser zu verstehen. Von Seth Fletcher

PLASMADYNAMIK

70 **Galaktische Getriebe**

Schwarze Löcher sind durch Rückkopplungseffekte eng mit ihrer Umgebung verbunden. Das könnte der Schlüssel unter anderem zur Sternentstehung sein. Von Thomas Lewton

GEOMETRIE

76 **Die Mathematik des Knitterns**

Wenn man ein Blatt Papier zerknüllt und wieder glatt zieht, entstehen scheinbar willkürlich angeordnete Falten. Eine neue geometrische Theorie kann diese Muster nun erklären. Von Stephen Ornes

TITELBILD: KKOLOSOV / GETTY IMAGES / ISTOCK; NEEDLE / STOCK.ADOBE.COM;
COMPOSING UND BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

12 Die letzte Grenze der Fluoreszenzmikroskopie

MICHAEL WEBER UND HEINRIK VON DER LINDÉ, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MULTIDISZIPLINÄRE NATURWISSENSCHAFTEN

36 Massenaussterben

VICTOR LESNYK / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2022



44 Fischerei im Umbruch

PETER ESSICK



64 Zentrum der Milchstraße

EFT COLLABORATION, UNWIKESO.ORG/PUBLICDOMAIN/IMAGES/ESDZ2008-EFT/INWIKI//CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS ORG/LICENSING/4.0/LEGALCODE)

76 Mathematik des Knitterns

OUJLS / GETTY IMAGES / ISTOCK



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

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

Union-Island-Gecko

Erst 2005 wurde der winzige Union-Island-Gecko (*Gonatodes daudini*) beschrieben. Die Art findet sich nur in einem rund 50 Hektar großen Waldstück auf einer kleinen Karibikinsel namens Union Island. Leider entdeckte schnell auch der Tierhandel die ungewöhnlichen Reptilien: Im düsteren Inneren des Waldes sind sie unscheinbar braun, doch im hellen Licht wandeln sie sich langsam in ein geradezu psychedelisch buntes Wesen.

Im Jahr 2018 war der Bestand auf schätzungsweise weniger als 10 000 Stück zurückgegangen. Alarmiert ergriffen nationale und internationale Naturschutzorganisation und Regierungsbehörden strenge Maßnahmen. Mit Erfolg, wie »Fauna&Flora International« jetzt meldet: Mittlerweile hat sich die Population wieder fast verdoppelt.







T. MÜLLER, MPI FÜR ASTRONOMIE

ASTRONOMIE

Das erdnächste Schwarze Loch

► In weniger als 1600 Lichtjahren Entfernung befindet sich das bisher erdnächste bekannte Schwarze Loch. Das von einer Arbeitsgruppe um Kareem El-Badry vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg und dem Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge entdeckte Objekt wird von einem Stern umkreist, der unserer Sonne ähnelt. Laut dem Team gibt es kein plausibles astrophysikalisches Szenario, das die Umlaufbahn erklären kann und ohne ein Schwarzes Loch auskommt. Schwarze Löcher sind Objekte, deren Masse auf ein extrem kleines Volumen konzentriert ist. Allein in der Milchstraße sind schätzungsweise 100 Millionen Exemplare aus dem letzten Entwicklungsstadium massereicher Sterne hervorgegangen. Bestätigte Funde gibt es bisher allerdings nur wenige.

Die Forschungsgruppe hat Daten der europäischen Raumsonde Gaia genutzt und um gezielte Messungen mit Teleskopen ergänzt. Die Astro-

metrie-Mission Gaia ist für hochpräzise Messungen von Sternpositionen ausgelegt. Winzige Verschiebungen des Begleitsterns verriet die Anwesenheit des Gaia BH1 getauften Schwarzen Lochs mit rund zehn Sonnenmassen (im Bild eine Illustration). El-Badry zufolge wird es von einem sonnenähnlichen Stern mit einer Umlaufzeit von 185,6 Tagen umkreist. Die Distanz zueinander entspricht etwa dem Abstand zwischen Erde und Sonne. Würde es sich bei Gaia BH1 um einen anderen Stern handeln, müsste dieser zwangsläufig viel heller leuchten als sein Begleiter. Das zeigen weder die Gaia-Daten noch Folgebeobachtungen.

Der Vorgängerstern von Gaia BH1, der später zum Schwarzen Loch wurde, muss mindestens 20 Sonnenmassen und eine entsprechend kurze Lebensdauer in der Größenordnung von wenigen Millionen Jahren gehabt haben. Wären beide Sterne etwa zur selben Zeit entstanden, hätte sich der massereichere als Überriese bis weit über die gemeinsame Umlaufbahn hinaus aufgebläht. Offenbar verstehen wir noch nicht lückenlos, wie sich solche Systeme herausbilden.

MNRAS 10.1093/mnras/stac3140, 2022

ARCHÄOMETRIE

Troja beschaffte sein Gold von weit her

► Für Gold nahmen die Menschen der Frühbronzezeit offenbar beträchtliche Handelswege in Kauf, wie ein Team um Ernst Pernicka vom Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie in Mannheim herausfand. So stammt Gold, das in Troja, in der sumerischen Stadt Ur im heutigen Irak, in Poliochni auf der Ägäisinsel Lemnos und in Georgien ans Licht kam, aus derselben Quelle.

Die Forscherinnen und Forscher untersuchten insgesamt 61 Goldobjekte aus Troja und Poliochni, die in ein Zeitfenster von ungefähr 2500 bis 2000 v. Chr. datiert werden. Um Proben zu entnehmen, nutzten sie ein tragbares Lasergerät, das winzige Mengen des Metalls herausschmilzt. Dadurch blieben die wertvollen Objekte weitgehend unbeschädigt. Zudem lässt sich mit solchen Proben die Metallzusammensetzung sehr genau bestimmen.

Die archäometrische Analyse und der Vergleich mit den Erkenntnissen aus anderen Studien ergab, dass das Gold hohe Konzentrationen von Zinn, Palladium und Platin enthält. Die Spurenelemente belegen, dass es sich hauptsächlich um Schwemmgold handelt, also um Waschgold aus Flüssen. Den genauen Ursprungsort des Metalls konnte die Arbeitsgruppe noch nicht ermitteln. Sie vermutet aber, dass es aus Georgien kam.

WASCHGOLD Die Gewandnadel stammt aus Poliochni (Lemnos, Griechenland).



CHRISTOPH SCHWALL / ÖM WIEN

Einige der Goldketten aus Troja und Poliochni gleichen sich zudem in der Machart. Auch Schmuckstücke aus Troja und solche aus den Königsgräbern von Ur ähneln sich stilistisch. Dies legte bereits Verbindungen zwischen den Fundorten nahe. Die aktuellen Goldanalysen bestätigen nun, dass es womöglich Handelskontakte zwischen Anatolien, dem Ägäisraum, Mesopotamien und dem Kaukasus gab.

Journal of Archaeological Science
10.1016/j.jas.2022.105694

TOXOPLASMOSE

Leittier dank Parasit

► An Toxoplasmose erkrankte Wölfe scheinen wesentlich häufiger zu Rudelführern zu werden als nicht infizierte Artgenossen, berichten US-amerikanische Wissenschaftler. Der Neuroparasit mache die Tiere wohl aggressiver, was im Kampf um die Führung von Vorteil sein könne. Mit dem Einzeller *Toxoplasma gondii* infizierte Wölfe werden demnach mit 46-mal größerer Wahrscheinlichkeit zum Leittier.

Das Team um Connor Meyer von der University of Montana in Missoula hatte Daten zum Verhalten und der Verteilung von Wölfen (*Canis lupus*) analysiert, die zwischen 1995 und 2020 im Yellowstone-Nationalpark im US-Bundesstaat Wyoming gesammelt wurden. Zusätzlich nahmen die Forscher Blutproben von 229 betäubten Tieren und untersuchten sie auf Antikörper gegen *Toxoplasma gondii*.

Wie die Biologen beobachteten, verhielten sich infizierte Wölfe – sowohl Männchen als auch Weibchen – risikoreicher. Das äußerte sich etwa in einer größeren Wahrscheinlichkeit, das Rudel früher zu verlassen. Ein solches Verhalten erscheint für den Erreger durchaus vorteilhaft, da er so eher in Gegenden gelangt, in denen er zuvor noch nicht kursierte. Ähnlich

wirkt es sich aus, wenn infizierte Tiere Rudelführer werden.

Bei vielen Tierarten ist bekannt, dass eine Toxoplasmose-Infektion ihr typisches Verhalten stark verändert. Ob der Neuroparasit auch beim Menschen Verhaltensänderungen bewirkt, wird noch kontrovers diskutiert. Studien berichten unter anderem von einem im Straßenverkehr rücksichtloseren Verhalten bei Infizierten, einem größeren Drang zu Unternehmertum sowie von einer Neigung zu pathologischem Jähzorn. All diese Untersuchungen zeigen allerdings nur Korrelationen, keinen ursächlichen Zusammenhang.

Communications Biology 5, 2022

EXTREMWETTER

Was zur Katastrophe von Lytton führte

► Von der Gemeinde Lytton in der kanadischen Provinz British Columbia blieb nach einem Buschbrand am 30. Juni 2021 fast nichts übrig – einen Tag, nachdem der Ort mit 49,6 Grad Celsius einen neuen landesweiten Temperaturrekord aufgestellt hatte. Eine neuntägige extreme Hitzewelle lastete zu dieser Zeit über dem Westen Nordamerikas: Die Durchschnittstemperaturen lagen um 10, bisweilen sogar mehr als 30 Grad Celsius höher als normal. Ein Team um Samuel Bartusek vom Lamont-Doherty Earth Observatory hat jetzt

die bislang umfassendste Studie vorgelegt, wie es zu der Katastrophe von Lytton kommen konnte.

Die Autoren analysierten dazu Klimadaten seit den 1950er Jahren und verglichen sie mit täglichen Wetterbeobachtungen aus den Wochen vor und während der Hitzewelle. Ihre zentrale Schlussfolgerung: Ein solches Ereignis wäre ohne die vom Menschen verursachte Erderwärmung praktisch unmöglich gewesen. Heute kann es statistisch gesehen alle 200 Jahre vorkommen.

Dazu kamen weitere klima- und wetterbedingte Einflüsse. So war der Jetstream zur fraglichen Zeit quasi blockiert: Er buchtete stark nach Norden und Süden aus und verharrte in diesem Muster, statt weiterzuziehen. Über dem Westen Nordamerikas, Skandinavien und Osteuropa sowie Teilen Sibiriens bildeten sich dadurch so genannte Hitzedome aus, die Temperaturen stiegen immer weiter.

Für den Westen Nordamerikas verschlimmerte eine regionale Besonderheit die Lage: Eine Reihe kleinerer atmosphärischer Wellen, die im westlichen Pazifik entstanden waren, verschmolz über dem Land mit der größeren Jetstream-Welle, was diese intensivierte und festigte.

Des Weiteren ist der Westen der USA und Kanadas in den letzten Jahrzehnten zunehmend ausgetrocknet. Daher verdunstete während der Hitzewelle weniger Wasser aus Vegetation und Boden. Ohne den Kühleffekt erwärmten sich die Oberfläche und die darüber liegende Luft noch stärker.

Nature Climate Change 10.1038/s41558-022-01520-4, 2022

KARI GREER / USIA



EIN BUSCH-BRAND wurde dem kanadischen Ort Lytton zum Verhängnis.

PALÄONTOLOGIE

Ediacara-Fauna verdaute wie heutige Tiere

► Bereits vor dem Kambrium lebten tierähnliche Wesen mit Mund und Darm, berichten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler um Ilya Bobrovskiy vom Deutschen Geoforschungszentrum in Potsdam. Die Arbeitsgruppe hatte fossile Überreste der Ediacara-Fauna untersucht. Das sind urzeitliche Organismen, die vor etwa 540 bis 580 Millionen Jahren lebten – also noch vor der kambri-schen Artenexplosion, während der sich die meisten der heute existierenden Tierstämme entwickelten.

In Fossilien diverser Ediacara-Organismen, die in Felsformationen nahe dem Weißen Meer (Russland) gefunden worden sind, stießen die Wissenschaftler auf Spuren von Cholesterin, ein vor allem in tierischen Zellen vorkommendes Molekül. Im umgebenden Gestein ließen sich dagegen Lipidrückstände von Algen und Bakterien nachweisen. Manche Fossilien zeigten einen Zentralbereich, der einem Darm ähnelte. Hier gab es Phytosterole – chemische Verbindungen, die in Pflanzen vorkommen. Das deutet darauf hin, dass die Organismen Algen gefressen und die Nährstoffe aufgenommen hatten.

Bobrovskiy und sein Team interpretieren ihre Befunde als Beleg dafür, dass die Ediacara-Wesen einen Darm sowie einen Mund besaßen und ihre Nahrung (vor allem Algen und Bakterien) bereits auf ähnliche Weise verdauten wie heutige Tiere. Das gelte etwa für Lebewesen wie *Kimberella* – eine ausgestorbene Gattung, deren Vertreter abgeplattete Nacktschnecken mit einem schildförmigen Rückenpanzer ähnelten. Laut versteinerten Spuren krochen sie in flachem Wasser über den Meeresboden und weideten Mikroben- und Algenmatten ab. Dagegen enthielten Fossilien von *Dickinsonia*, die vermutlich wie gesteppte Kissen oder Luftmatratzen aussahen und über den Meeresgrund schwebten, keine Lipidrückstände, die auf Verdauungstätigkeit in einem Darm schließen lassen. Demnach dürfte *Dickinsonia* die Nahrung außerhalb des Körpers zersetzt und die Nährstoffe anschließend über die Oberfläche aufgenommen haben.

Wie die Wissenschaftler betonen, spielte die Ernährung eine wichtige Rolle für die Entwicklung der Ediacara-Fauna: Eine energiereiche Nahrung aus Algen könnte erklären, warum manche Organismen unter ihnen so groß wurden. Im Gegensatz dazu stammen fast alle älteren Fossilien von einzelligen und mikroskopisch kleinen Lebewesen.

Current Biology 10.1016/j.cub.2022.10.051, 2022

EXOPLANETEN

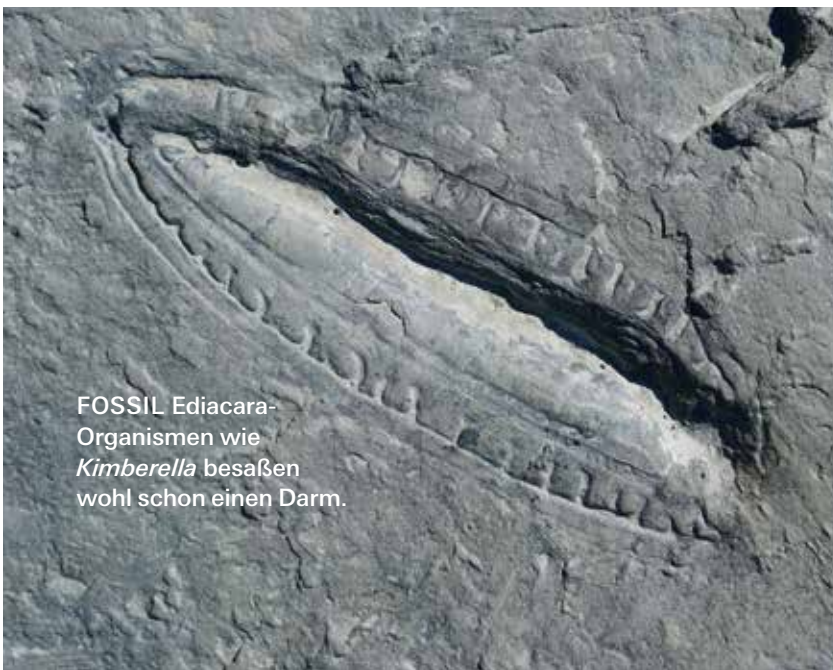
Blick in eine ferne Atmosphäre

► Das James Webb Space Telescope (JWST) hat eine Fülle an Informationen über einen Exoplaneten geliefert, der rund 700 Lichtjahre von unserer Erde entfernt ist. Der Himmelskörper namens WASP-39b wurde bereits 2011 entdeckt, aber noch nie so detailliert untersucht. Er ist ein Gasriese wie Jupiter, besitzt jedoch nur etwa ein Drittel von dessen Masse. In lediglich vier Erdtagen umkreist er einen sonnenähnlichen Stern, ist ihm sehr viel näher als Merkur unserer Sonne und rund 900 Grad Celsius heiß.

Bereits Anfang 2022 gelang bei WASP-39b mit Hilfe von JWST der erste Nachweis von Kohlendioxid in der Atmosphäre eines Exoplaneten. Seither identifizierte das Weltraumteleskop weitere Elemente und chemische Verbindungen: Natrium, Kalium, Wasser, Schwefeldioxid und Kohlenmonoxid. Das Vorhandensein von Schwefeldioxid deutet darauf hin, dass in der Atmosphäre eine fotochemische Reaktion abläuft – ähnlich wie die Sonne in der Erdatmosphäre Ozon aus Sauerstoff erzeugt. Im Fall von WASP-39b spaltet das Licht seines Sterns Wasser in atomaren Wasserstoff und Hydroxylradikale auf. Letztere reagieren mit Schwefelwasserstoff zu Schwefeldioxid.

Die Beobachtungen zeigen außerdem ein relativ niedriges Verhältnis von Kohlenstoff zu Sauerstoff. Vermutlich hat sich der Planet viel weiter draußen in seinem Sternsystem gebildet und dort große Mengen Wasser in Form von Eis aufgenommen. Erst später geriet er in seine jetzige enge Umlaufbahn. Unklar ist, ob sich der Prozess über lange Zeit hinzog oder durch einen Gravitationsstoß von einem anderen Planeten oder Nachbarstern ausgelöst wurde.

Ein weiteres Phänomen wurde bislang ebenfalls bei noch keinem anderen Exoplaneten nachgewiesen: WASP-39b hat eine unvollständige



FOSSIL Ediacara-Organismen wie *Kimberella* besaßen wohl schon einen Darm.

ILYA BOBROVSKIY / GFZ-POTSDAM

Wolkendecke. An der Grenze zwischen Tag und Nacht verdunsten die Wolken vermutlich in der Hitze und kondensieren wieder an der kühleren Seite.

Pressemitteilung des MPIA vom 22. November 2022

VERHALTENSBILOGIE

Kraken werfen mit Gegenständen

► Oktopusse erzeugen Wasserstrahlen, um Artgenossen etwa mit Schlamm, Steinen oder Muschelschalen zu bewerfen. Das berichten Peter Godfrey-Smith von der University of Sydney und sein Team, die Gemeine Sydneykraken per Video beobachteten. Wie die Autorinnen und Autoren schreiben, sammeln die Tiere Schlamm und Objekte mit ihren Armen auf und drehen dann ihren Siphon so, dass der Wasserstrahl die Gegenstände in Richtung des Ziel-Oktopusses schleudert. In der Hälfte der Fälle taten sie das, wenn andere Kraken sie mit ihren Tentakeln betatschten oder versuchten, sich mit ihnen zu paaren. Treffer landeten die Meeresbewohner aber nur bei 17 Prozent der Würfe.

Es gilt als sehr selten, dass Tiere gezielt Dinge auf andere werfen; bisher ist solches Verhalten vor allem von in Gruppen lebenden Säugetieren wie Affen und Elefanten bekannt. Oktopusse dagegen sind eher Einzelgänger. Dennoch interpretiert die Arbeitsgruppe die Würfe als soziale Verhaltensweisen, zumal sie keineswegs selten auftreten. In nur rund 24 Stunden Videomaterial entdeckten die Fachleute 102 Fälle von solchen Wurfattacken.

Dass dahinter Absicht steckt, zeigt unter anderem die Körperfärbung. Die Tiere können ihre Hautfarbe gezielt verändern, und das Muster gibt Aufschluss über ihre aktuelle Stimmung. Eine dunkle, einheitliche Färbung deutet auf Aggressivität hin, und entsprechend warfen so gefärbte

Meerestiere am härtesten. Oktopusse mit heller Farbe oder fleckigem Muster taten dies dagegen deutlich sanfter.

PLOS ONE 10.1371/journal.pone.0276482, 2022

INTELLIGENZ

Neurone in der Petrischale lernen Pong spielen

► Ein Team um Karl Friston vom University College London hat Gehirnzellen in einer Petrischale beigebracht, das Videogame »Pong« zu spielen. Hierbei müssen senkrechte Balken auf dem Bildschirm nach oben und nach unten gelenkt werden, um einen hin und her springenden Ball abzufangen. In dem Experiment steuerten die Nervenzellen die Bewegung der Balken.

Die Wissenschaftler hatten zunächst Neurone aus Stammzellen von Menschen oder Mäusen gezüchtet. Diese kultivierten sie auf Mikroelektroden, die an das Spiel »Pong« angeschlossen waren. Mit Hilfe der Elektroden konnten die Experten den Zellverband an verschiedenen Stellen stimulieren. Um den Neuronen beizubringen, den Ball zu treffen,

machten sie sich die von Friston entwickelte »Theorie der freien Energie« zu Nutze: Nervenzellen reagieren demnach auf eine Art und Weise, die eine für sie vorhersehbare Umgebung erzeugt. Das braucht weniger Energie und erhöht die Überlebenschance. Somit sollte es möglich sein, ihr Verhalten zu beeinflussen, indem nach unerwünschten Reaktionen unvorhersehbare Rückmeldungen gegeben werden.

Die Versuchsleiter gingen hierbei wie folgt vor: Elektrische Reize zeigten Position und Weg des Balls auf dem Chip an, ihre Frequenz die Nähe zum Schläger. »Trafen« die Neurone den virtuellen Ball – reagierten sie also mit einer Aktivität, welche die Eingangssignale widerspiegelte, – so stimulierten die Fachleute sie erneut an der gleichen Stelle und mit gleicher Frequenz. »Trafen« sie ihn nicht, so regte das Team das Netzwerk an zufälligen Regionen und mit unterschiedlichen Frequenzen an. Zudem startete das Spiel neu, und der Ball begann seinen Weg an einer unvorhersehbaren Position.

Innerhalb weniger Minuten lernten die Nervenzellen das Spielprinzip. Die Arbeit sei ein Beweis dafür, dass Neurone in einer Petrischale lernen und grundlegende Anzeichen von Intelligenz zeigen können, so Brett Kagan, der Erstauteur der Studie.

Neuron 10.1016/j.neuron.2022.09.001, 2022

WEHRHAFT Ein Gemeiner Sydneykrake (*Octopus tetricus*) in Aktion.



PETER GODFREY-SMITH, DAVID SCHELL, STEPHANIE CHANCELLOR, STEPHAN LINDQUIST, MATTHEW LAWRENCE / COVER IMAGES / PICTURE ALLIANCE

FLUORESZENZMIKROSKOPIE

Die letzte Grenze

Schon vor 20 Jahren postulierte der Nobelpreisträger Stefan Hell, dass der Fluoreszenz-Lichtmikroskopie nach unten hin theoretisch keine Grenzen gesetzt sind. Heute verfolgen Fachleute live und nanometergenau sogar einzelne Proteine – laut Hell der Anfang einer neuen Ära.

» spektrum.de/artikel/2085720



Verena Tang ist Chemikerin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.



AUF EINEN BLICK

Zoom aufs Molekül

- 1** Um lebende Materie zu beobachten, nutzt man Fluoreszenzmikroskopie. Seit Forscher das Feld in den 2000er Jahren revolutionierten, kann man damit Strukturen bis etwa 20 Nanometer auflösen.
- 2** Mit einer neuen Technik lassen sich jetzt aber sogar Details bis auf einzelne Nanometer und darunter unterscheiden.
- 3** So beobachten Fachleute bereits einzelne Proteinbewegungen und lokalisieren Moleküle in winzigen Zellstrukturen innerhalb von Millisekunden nanometergenau.

INDIVIDUEN Jede Kernpore trägt achtmal das Kernporenpotein NUP96, hier mit Fluoreszenzmarkern sichtbar gemacht. Die Bilder zeigen die leuchtenden Moleküle einzeln aufgelöst – verorten lassen sie sich sogar auf wenige Ångström genau. Man erkennt, dass jede Kernpore individuell geformt ist.

► »Danger – Laser on!«, warnt ein leuchtendes Schild. Daneben steigt Jessica Matthias in eine schwarze Tonne, die an eine Litfaßsäule erinnert. Die Säule dreht sich, und als die Öffnung wieder sichtbar wird, ist die Forscherin verschwunden. Ein beherzter Schritt hinein, eine halbe Umdrehung, und man tritt auf der anderen Seite in einen schummrig rot beleuchteten Raum. Alle Fenster sind mit schwarzer Folie abgeklebt. Ein langer optischer Tisch steht auf schwingungsgedämpften Füßen, darauf eine weiträumige, mit dunklen Planen abgedeckte Apparatur. Neben dem Tisch thront ein großes Mikroskop, rechts davon steht ein Schreibtisch mit mehreren Bildschirmen. Hier, im Untergeschoss des Max-Planck-Instituts für medizinische Forschung in Heidelberg, vermisst das Team um den Physiker Stefan Hell gerade nanometergenau die Bewegungen einzelner Moleküle – in Echtzeit.

Jessica Matthias, Postdoc der biophysikalischen Chemie in Hells Forschungsgruppe, zeigt auf das Gerät unter der schwarzen Plane. »Mit diesem Aufbau haben wir das Kinesin gemessen«, sagt sie leise. Wir dürfen nicht zu laut sein, da sogar Sprechen die laufende Messung stören kann. Deswegen ist die Apparatur auch nach hier unten verbannt, denn dort sind die Erschütterungen, die von außen ankommen, am geringsten. Kinesin-1 ist ein winziger zellulärer Transporter. Er bringt Bausteine für Proteine und weitere Fracht innerhalb einer Zelle von einem Ort zum anderen, indem er an kleinen Röhren entlangläuft, den so genannten Mikrotubuli. Im Prinzip kann man sich das Motorprotein wie zwei ineinander verdrillte Schnüre vorstellen, an deren Ende sich zwei klobige Fortsätze befinden. Die beiden Ausstülpungen setzt das Protein abwechselnd voreinander und »läuft« so auf den Mikrotubuli. Tatsächlich erinnern sie damit an Füße, werden in der Biologie aber als Köpfe bezeichnet.

Die Doktoranden Lukas Scheiderer und Jan Otto Wolff aus Hells Team haben jeden dieser Schritte minutiös beobachtet: mit einer Genauigkeit von 1,7 Nanometern (ein Nanometer ist ein Milliardstel Meter) und mit einer zeitlichen Auflösung von weniger als einer Millisekunde. Um das zu ermöglichen, hat Nobelpreisträger Hell vor Kurzem zwei Ideen kombiniert, die jede für sich bereits eine Revolution der Mikroskopie darstellten.

Die Welt der Moleküle ist dem menschlichen Auge verborgen. Die Teilchen sind nicht nur zu klein, sie bewegen sich auch zu schnell, als dass wir sie live nachverfolgen könnten. Um in den Nanokosmos vorzudringen, bedienen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler einer Reihe ausgeklügelter Techniken: Die Elektronenmikroskopie erreicht durch Messung der Elektronendichte eine Präzision von Zehntelnanometern, kann mitunter einzelne Atome voneinander unterscheiden. Viele hundert Aufnahmen werden dazu angefertigt, übereinandergelegt und ergeben schließlich das detaillierte Bild. Die Bewegungen von Proteinen wiederum lassen sich mit aufwändigen Computersimulationen nachvollziehen. Lebendes Material direkt zu beobachten, gelingt aber nur mit einem Lichtmikroskop.

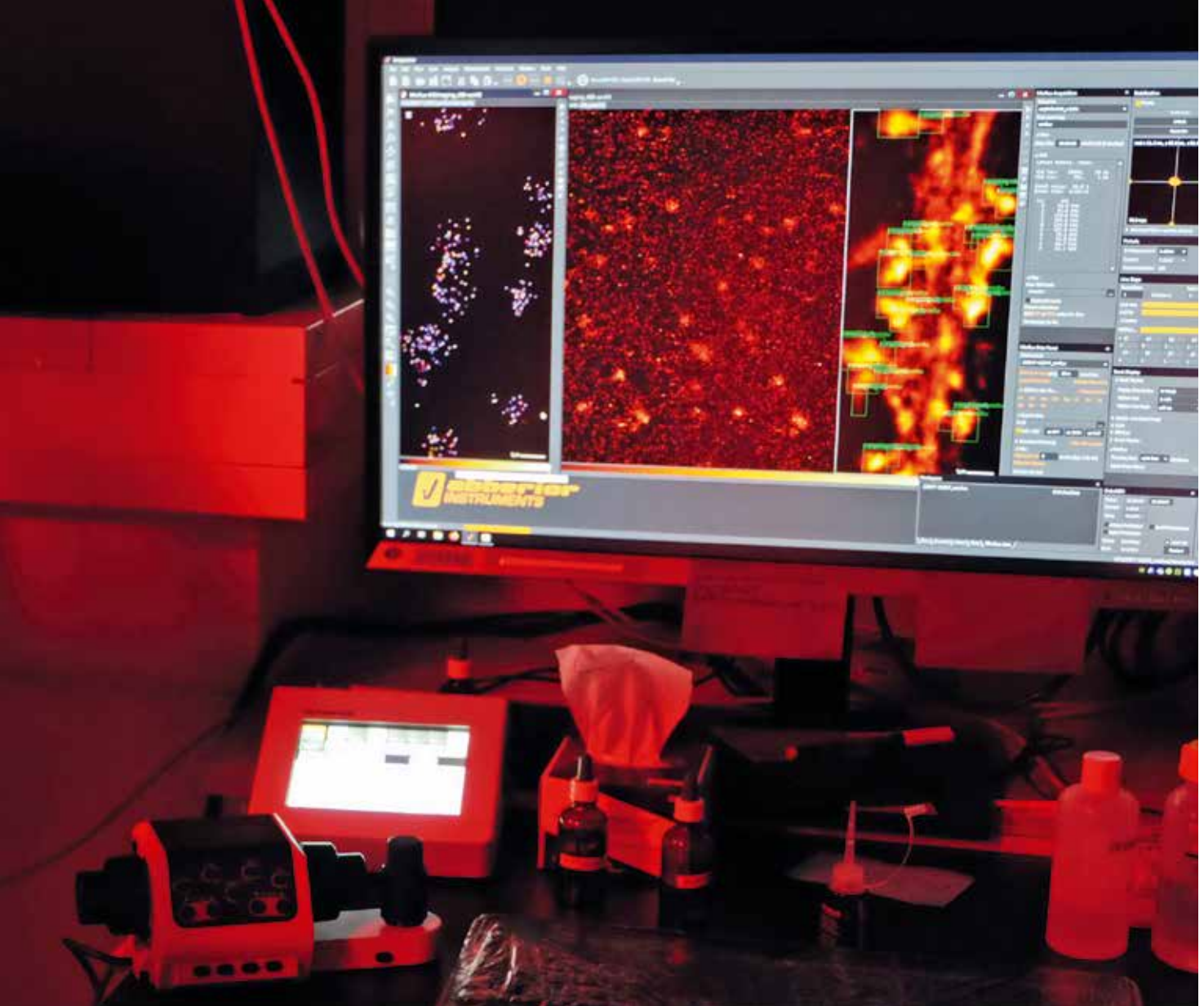


DETAILAUFNAHME
Laufende Messung in den Heidelberger Laboren von Stefan Hell: Auf dem rechten Bildschirmteil eine konfokale Aufnahme einer Nervenzelle, verwaschen zu erkennen die Dendriten. Links auf dem Bildschirm ein 6x15 Mikrometer großer Ausschnitt aus dem großen Bild, der mit MINIFLUX genau aufgenommen wird. Blaue und violette Punkte zeigen detektierte Leuchtsignale.

Seit Jahrzehnten nutzen Biologen dazu Fluoreszenzmikroskope: Diejenigen Strukturen, die man sichtbar machen will, bringt man gezielt zum Leuchten – entweder durch fluoreszierende Proteine oder durch kleine Moleküle, die an die interessierende Struktur gekoppelt und dann per Laserstrahl zum Leuchten angeregt werden (siehe »Fluoreszenz«). Mit dieser Fluoreszenzmarkierung kann man nahezu jede Struktur in lebendem Material in leuchtendem Rot, Grün, Blau oder anderen Farben sichtbar machen. Die bunten Aufnahmen von Zellkernen und Co sind heute unverzichtbare Werkzeuge, um Zellvorgänge und Krankheiten zu erforschen.

Bis hierher und nicht weiter

In den 1990er Jahren war die Lichtmikroskopie allerdings kein Feld, auf dem man wissenschaftliche Lorbeeren hätte erwarten können. Die Grenzen der Technik schienen ausgereizt: Wenn ein Lichtstrahl auf eine Probe zuläuft, wird er gebeugt, und durch diese Beugung verschwimmen zwei Objekte, die näher beieinanderliegen als die halbe Wellenlänge des Lichts, zu einem einzigen Punkt.



Weil die Wellenlänge sichtbaren Lichts zwischen etwa 400 (violett) und 700 Nanometer (rot) liegt, müssen zwei Strukturen mindestens 200 bis 300 Nanometer auseinanderliegen, damit man sie noch als getrennt wahrnehmen kann. Mit dieser fixen Grenze konnte man zwar einzelne Organellen einer Zelle mit Leuchtmarkern getrennt voneinander sichtbar machen – nicht aber in deren Innenleben blicken. Verfahren, die auf anderen physikalischen Prinzipien beruhen wie die Elektronenmikroskopie, galten als vielversprechender, um kleinste Strukturen aufzulösen. Ihr Manko: Sie eignen sich nicht, um lebendes Material oder Bewegung direkt zu beobachten. Die biologischen Abläufe im Nanokosmos, so schien es, sollten dem menschlichen Blick für immer verborgen bleiben.

Hell versuchte dennoch, die Auflösungsgrenze zu knacken. Seine entscheidende Idee stellte er 1994 in der Fachzeitschrift »Optics Letters« vor: Während ein punktförmiger Laserstrahl die Fluoreszenzmoleküle zum Leuchten anregt, schaltet ein zweiter Laserstrahl einen Großteil von ihnen direkt wieder aus – mittels stimulierter Emission. Dieser ausschaltende STED-Strahl (STED steht für Sti-

mulated Emission Depletion, deutsch stimulierter Entzug der Molekülanregung, siehe »Fluoreszenz«) besitzt die Form eines Donuts: Er hat in der Mitte ein Loch. Alle Moleküle im Bereich des »Donut«-Rings werden ausgeschaltet, so dass allein die wenigen in der Mitte noch Leuchtsignale aussenden können. Die Auflösung steigt dadurch um ein Vielfaches, weil der Ausschaltstrahl den Bereich, in dem Moleküle leuchten können, massiv verkleinert. Mit der Kombination aus An- und Ausschaltstrahl rastert man die gesamte Probe ab und erhält so ein mehrfach schärferes Bild als mit einem gewöhnlichen Fluoreszenzmikroskop.

Um das Jahr 2000 erweiterte Hell das STED-Konzept durch andere Mechanismen des molekularen An- und Ausschaltens der Fluoreszenz, wie sie ab 2006 auch der Physiker Erich Betzig, heute an der University of California in Berkeley, und weitere Forscher in den USA erfolgreich verwendeten. Doch Betzig schaltete benachbarte Fluoreszenzmoleküle nicht durch einen genau positionierten Donut-Strahl an und aus, sondern jedes einzelne Molekül für sich – an einem zufälligen Ort. Er nutzte dabei W.E. Moerners Entdeckung, dass man einzelne organi-

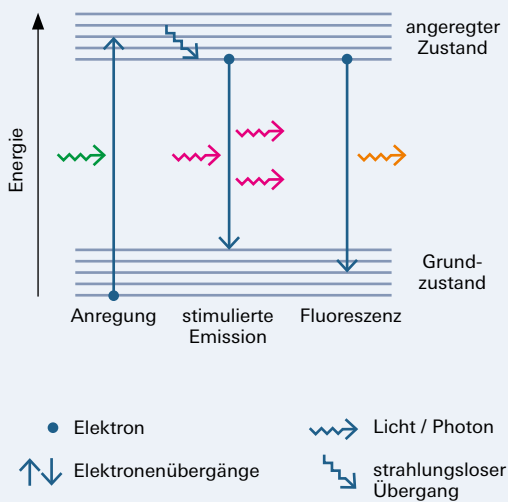
Fluoreszenz

Manche Stoffe leuchten, wenn man sie mit Licht einer bestimmten Wellenlänge bestrahlt. Das Phänomen kennt man etwa von Markern oder von chinihaltigen Getränken, die unter UV-Licht bläulich strahlen. Fluoreszierende Objekte beginnen nach der Anregung zu leuchten; erfolgt das Leuchten zeitverzögert, wie etwa bei manchen Aufklebern für die Zimmerwand, spricht man von Phosphoreszenz.

Das Licht, das auf die Substanz trifft – der Anregungsstrahl –, hebt ein Elektron aus dem Grundzustand in einen angeregten Zustand. Von hier aus springt es durch Abgabe von Strahlung wieder in den Grundzustand. Einen Teil der Energie des auftreffenden Lichts gibt das Elektron durch strahlungslose Übergänge ab; daher ist das ausgesandte Licht energieärmer und besitzt eine höhere Wellenlänge, ist also gegenüber dem Anregungslicht rotverschoben (Stokes-Verschiebung). Aus diesem Grund können etwa mit UV-Licht angeregte Substanzen Licht im sichtbaren Bereich abgeben.

Stimulierte Emission

Der Übergang vom angeregten Zustand in den Grundzustand lässt sich durch Stimulation mit Licht der entsprechenden Wellenlänge erzwingen (stimulierte Emission). Das Molekül kann dadurch nicht mehr fluoreszieren.



sche Moleküle optisch detektieren kann. Bei diesem Einzelmolekülverfahren stellt man sicher, dass innerhalb des 200 bis 300 Nanometer großen Bereichs, in dem zwei Leuchtsignale auf Grund der Lichtbeugung nicht sauber voneinander zu trennen wären, statistisch gesehen maximal ein Molekül angeschaltet und damit leuchtfähig ist, während alle anderen nicht fluoreszieren können. So lässt sich dieses Molekül problemlos von seinen Nachbarn unterscheiden. Um herauszufinden, wo genau sich nun das angeschaltete Molekül innerhalb des 200 bis 300 Nanometer großen Bereichs befindet, registriert man den Beugungsfleck des Fluoreszenzlichts auf einer Kamera und berechnet sein Maximum. Denn das Maximum des Beugungsflecks muss der Molekülposition in der Probe entsprechen. Betzig taufte seine Methode »Photo-Activation Localization Microscopy«, kurz PALM. Die Physikerin Xiaowei Zhuang, die das Verfahren an der Harvard University fast zeitgleich entwickelte, nannte es STORM, kurz für »Stochastic Optical Reconstruction Microscopy«. Bei beiden Vorgehensweisen erhält man durch mehrere Messungen statistisch ein Bild aller in der Probe an verschiedenen Zeiten und Orten angeschalteten Fluoreszenzmoleküle, so dass das scharfe Bild sich durch die Registrierung vieler einzelner Fluoreszenzmoleküle aufbaut.

Im Gegensatz zu diesen stochastischen Verfahren steuert man bei STED genau, in welcher Region die Moleküle fluoreszieren und wo sie dunkel bleiben, und tastet die Probe mit der Kombination aus Anregungs- und STED-Laser räumlich kontrolliert ab.

Fenster zu einer neuen Welt

Alle drei Methoden brachten es auf Auflösungen um die 20 Nanometer, zehnmal feiner als mit einem herkömmlichen Lichtmikroskop möglich (siehe »Jenseits der Beugungsgrenze«). Damit öffneten sie das Fenster zu einer neuen Welt, die man bis dahin nur als verwaschene Schemen wie durch Ornamentglas betrachten konnte. Konnte man beim Blick auf eine Zelle bislang nur grob erahnen, wo sich welche Organellen befinden, so sah man jetzt deren Proteinverteilung im Detail. Auf dem Gang von Hells Forschungstrakt säumen überdimensionale Fotografien, gut ein mal ein Meter groß, die wichtigsten Meilensteine: hunderte grüne Punkte leuchten vor schwarzem Grund, jeden von ihnen umgibt ein Ring kleinerer, rot leuchtender Pünktchen: Kernporenkomplexe, in natura mit einem Durchmesser von zirka 100 Nanometern. Das Zytoskelett einer Säugetierzelle, ein orange fluoreszierendes Netzwerk filigraner Linien, die sich durch eine schwarze Landschaft schlängeln wie das leuchtende Wirrwarr aus Straßen, das man bei Nacht aus einem Flugzeug sehen kann. Oder der Wachstumskegel einer Nervenzelle, die winzigen Strukturen hervorgehoben in Pink, Grün und Violett. 2014 erhielten Hell, Betzig und Moerner für ihre Errungenschaften den Nobelpreis für Chemie.

Doch der Blick auf die feinen Zellstrukturen war dem Heidelberger Physiker nicht genug. Ende August 2022 sitzt Stefan Hell in einem Gartenstuhl auf dem Rasen des Max-Planck-Instituts am Neckar und erzählt, wie er auf

die Idee kam, die ultrahochoflösenden Verfahren zu »verheiraten«. Der Wissenschaftler spricht schnell, so als könne er die vielen Worte gar nicht rasch genug loswerden, bevor sie veralten.

2007 lud ihn ein Redakteur der Fachzeitschrift »Science« ein, einen Übersichtsartikel über ultrahochoflösende Fluoreszenzmikroskopie zu verfassen. Dabei erkannte Hell, dass STED und PALM/STORM die Moleküle grundsätzlich auf die gleiche Art und Weise voneinander trennen, nämlich über das An- und Ausschalten ihrer Fluoreszenz. Letztlich ist bei beiden Verfahren der springende Punkt, Moleküle innerhalb des Radius von 200 bis 300 Nanometer – der Beugungsgrenze – über An und Aus zu unterscheiden; sonst bleiben sie beugungsbegrenzt. »PALM/STORM und STED sind damit grundsätzlich miteinander verwandt«, betont Hell, »es ist erstaunlich, dass die Leute das nicht gleich verinnerlichten.« Nicht die genaue Bestimmung der Mitte des Fluoreszenz-Beugungsflecks von einzelnen Molekülen auf der Kamera sei für PALM/STORM entscheidend gewesen: »Der Grund, weshalb man plötzlich scharfe Bilder bekam, war, dass man sie über das Schalten ihrer Fluoreszenzfähigkeit trennen konnte.«

STED-TECHNIK Im Labor entwickeln die Heidelberger spezielle Aufbauten für ihre Experimente. In dem durch die schwarzen Begrenzungen abgeschirmten Bereich links befindet sich die Laseroptik. Anregungs- und STED-Strahl werden aufeinander abgestimmt in das Mikroskop geleitet. Rechts des Mikroskops der Aufbau, um die Signale zu detektieren.

Aber dort, wo sich die Verfahren unterscheiden, ergänzte Hell, ergänzen sie sich ideal. Die Stärke der PALM/STORM-Verfahren ist es nämlich, die Moleküle einzeln voneinander zu trennen – also mit der maximal möglichen Feinheit, denn es ist unmöglich, eine Probe feiner zu »sezieren« als auf der molekularen Ebene. Wo das Molekül allerdings zu einem bestimmten Zeitpunkt aufleuchtet – und damit welches genau –, bleibt dem Zufall überlassen, die exakte Position muss man anschließend herausfinden. Umgekehrt weiß man bei STED immer, woher das Signal kommt, weil der präzise gesteuerte Donut das vorgibt. Aber STED kann die Moleküle nicht einzeln ansteuern.

Hell schrieb seine Idee auf, veröffentlichte sie – doch bei den meisten Kollegen verfiel sie nicht wirklich. Für viele war der Gedanke, dass alle Methoden letztendlich auf demselben Prinzip beruhen, fremd. »Ich konnte mir damals nicht vorstellen, dass sich eine solche grundlegende Erkenntnis nicht gleich durchsetzt. Das schnell wachsende Feld der Superauflösung glaubte wirklich, der Witz bei PALM/STORM sei die genaue Bestimmung der Mitte des Fluoreszenzmusters auf der Kamera«, erzählt der Forscher rückblickend und gesteht: »Das hat mich wirklich nachdenklich gemacht, wie Wissenschaft manchmal läuft.«

Doch Hell sieht das als Chance. »Wenn man etwas gut durchdrungen hat, dann hat man auch gute Chancen, den nächsten Durchbruch zu machen«, führt er seinen Gedankengang fort. »Ich bekam so die Idee, das Verfahren zu revolutionieren, mit dem man die Position einzelner Moleküle bestimmt – und zwar mit einem Donut.«



2011 meldet er ein Patent an: eine neue Technik namens MINFLUX, die Elemente von STED mit denen der Einzelmolekülmikroskopie zusammenführt. Mit dieser Methode haben Hell und sein Team die Skala, auf der Forscherinnen und Forscher lebende Materie beobachten können, noch einmal um das Zehnfache verfeinert. Statt einzelner Organellen können Fachleute jetzt die darin aktiven Proteine räumlich und zeitlich genau verfolgen.

Doch zunächst kam 2014 der Nobelpreis für die Entwicklung von STED. »Das war natürlich etwas ablenkend«, kommentiert der Physiker die Auszeichnung und wundert sich immer noch, dass niemand vor ihm die hochauflösenden Methoden miteinander kombiniert hat: »Obwohl die Quintessenz draußen war, ist nichts in diese Richtung passiert.« Im Dezember 2016 publizieren Hell und Mitarbeiter schließlich die erste Veröffentlichung zu MINFLUX. Auf einer Tagung kündigt ihn ein Wissenschaftler mit den Worten an, die Gemeinschaft der Einzelmolekülmikroskopiker sei von MINFLUX überrumpelt gewesen. »Wenn man glaubt, dass die Bestimmung der Spitze des Beugungsflecks auf einer Kamera essenziell für die Hochauflösung ist, denkt man an nichts anderes. Das war das psychologische Problem«, konstatiert Hell.

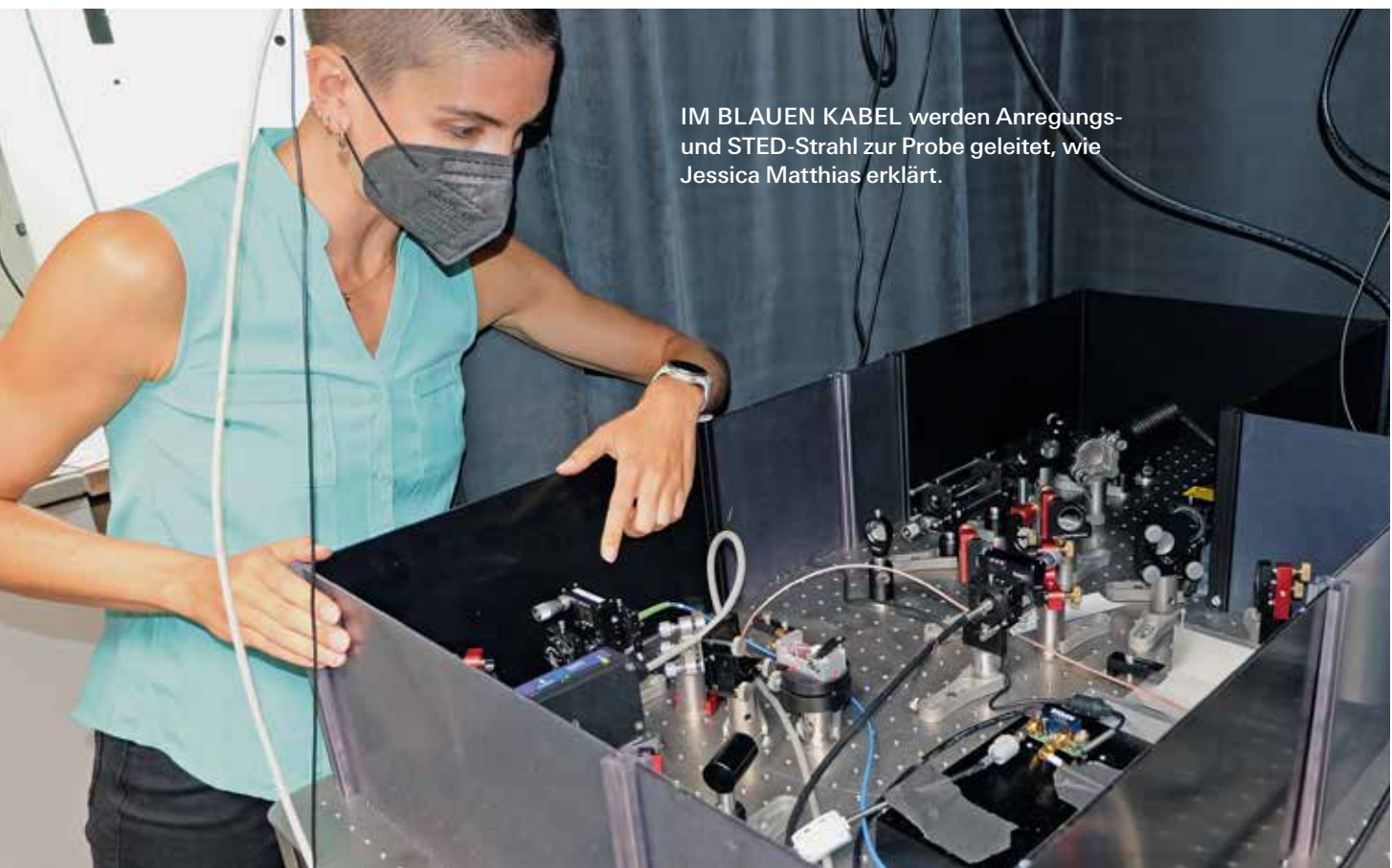
Die MINFLUX-Nanoskopie nutzt das stochastische An- und Ausschalten einzelner Moleküle der PALM/STORM-Methode und kombiniert es mit der genauen Lokalisierung aus dem STED-Ansatz. Zunächst aktiviert man nur wenige Fluoreszenzmoleküle, die sich in einer Probe befinden: Das heißt, man bringt sie in einen Zustand, in dem sie bei Anregung durch einen entsprechenden Laserpuls leuchten können. Entscheidend ist, dass dann ein Laserstrahl mit einer Nullstelle in der Mitte – also ein donutförmiger Laser wie bei STED – die Probe Stück

für Stück präzise abrastert. Doch diesmal regt der Donut die Moleküle nicht ab, sondern zur Fluoreszenz an. Darüber hinaus verwendet man statt einer Kamera einen einfachen Detektor, der das einfallende Fluoreszenzsignal registriert. Das erlaubt es auch, tiefer in die Zelle vorzudringen.

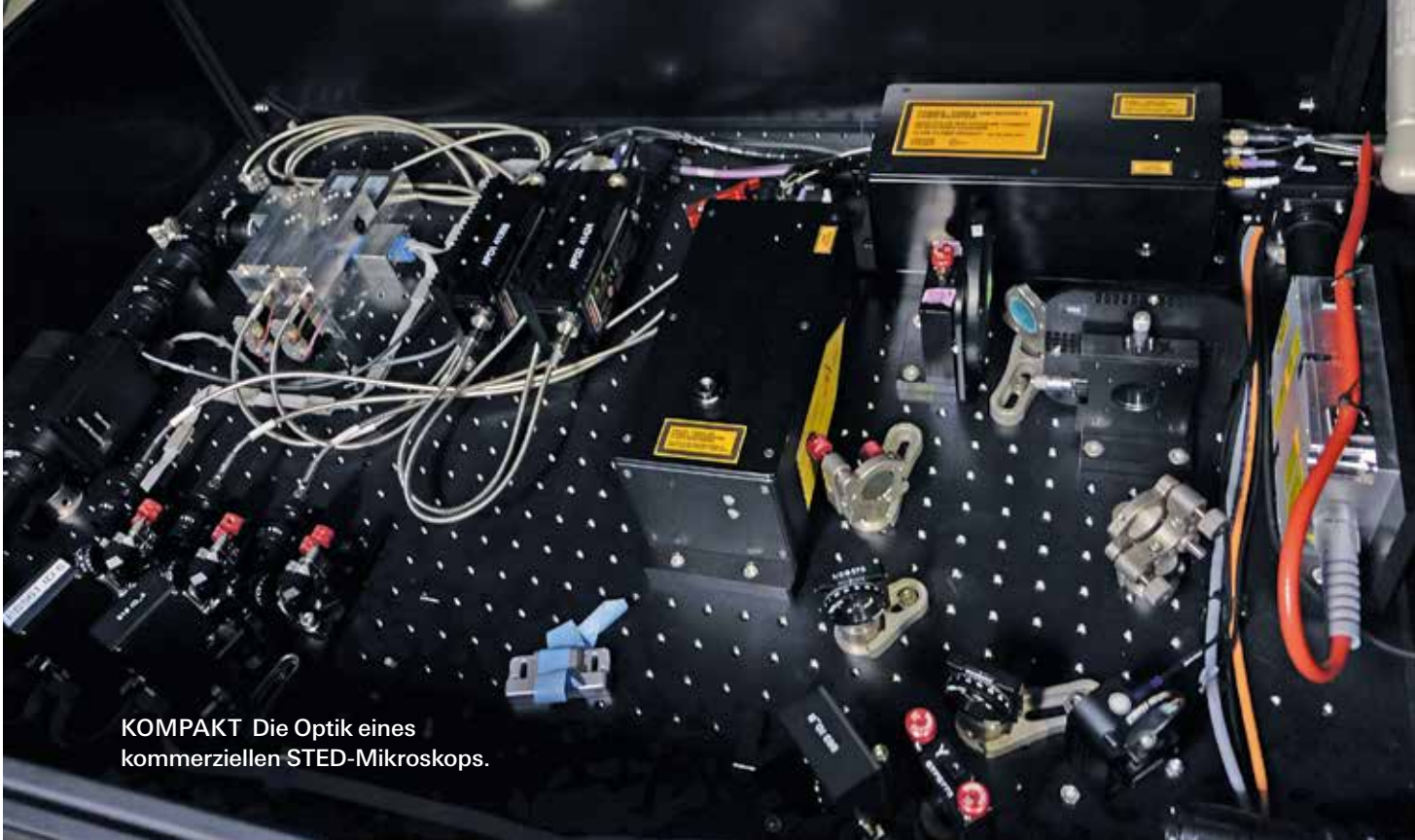
Trifft das »Loch« des Donutstrahls auf ein Fluorophor, kommt kein Fluoreszenzphoton im Detektor an: Denn in der Mitte des Donuts ist die Intensität des Anregungslasers gleich null. Trifft das Donutloch aber knapp daneben, wird der Fluorophor leicht angeregt und leuchtet schwach. Weil die Intensität des Anregungslasers von der Mitte zum Rand hin ansteigt, verändert sich die Zahl der ausgesandten Photonen mit dem Abstand von der Nullstelle. So verrät das Leuchten, wie nah die Donutmitte an der unbekanntenen Position des Moleküls ist. Je kleiner der Abstand, desto weniger Fluoreszenzphotonen braucht man, um herauszufinden, wo das Molekül liegt. Und diesen Abstand kann man Zug um Zug verringern, um die Genauigkeit nach oben zu treiben.

Volle Kontrolle

Die Wissenschaftler »injizieren« die Koordinaten sozusagen in die Probe: Der Doktorand Jan Otto Wolff, Erstautor der Veröffentlichung, erklärt: »Indem wir die Nullstelle sub-nanometergenau steuern, haben wir die volle Kontrolle darüber, wo sie sich befindet.« Weniger als 100 Fluoreszenzphotonen genügte ihm und seinen Kollegen bei der Messung des Kinesins, um das Molekül mit Präzisionen von unter einem Nanometer zu beobachten. Mit dem PALM-Verfahren bräuchte dazu man mehrere tausend, falls man überhaupt die Genauigkeit erreichen könnte.



IM BLAUEN KABEL werden Anregungs- und STED-Strahl zur Probe geleitet, wie Jessica Matthias erklärt.



KOMPAKT Die Optik eines kommerziellen STED-Mikroskops.

In der »Mikroskopie-Facility« des Instituts steht eins der MINFLUX-Mikroskope, die die Firma Abberior Instruments, eine Ausgründung der Max-Planck-Gesellschaft, heute weltweit vertreibt. Auf einem schwingungsgedämpften optischen Tisch sieht man einen Koffer aus Aluminium mit der Aufschrift MINFLUX, schätzungsweise zwei Meter lang, einen breit und rund 20 Zentimeter hoch. Darin befindet sich der optische Aufbau für die Laser; neben dem Koffer steht das dazugehörige Mikroskop. An einem großen Bildschirm auf einem Schreibtisch sind drei Bilder zu sehen (»Detailaufnahme«): Rechts orangefarbene längliche Strukturen auf schwarzem Hintergrund, eine mit einem gewöhnlichen Lichtmikroskop erstellte Aufnahme einer Nervenzelle. Man erkennt verwaschen die Dornfortsätze auf dem Dendriten. In der Mitte ein großes quadratisches Bild mit unregelmäßig angeordneten, größeren und kleineren orangefarbenen Punkten. Während diese beiden Darstellungen starr sind, tut sich in der linken etwas. Ein paar blau-violette Pünktchen sind sichtbar, langsam leuchten immer mehr davon auf. Das ist die laufende MINFLUX-Aufnahme. Jeder Punkt steht für ein detektiertes Signal, die Farbe zeigt die Zahl der emittierten Photonen an. Der Doktorand, der uns erlaubt hat, seiner Messung beizuwohnen, hat sich aus der rechten, konfokalen Aufnahme einen etwa 6 x 15 Mikrometer kleinen Ausschnitt ausgesucht, den er sich jetzt detaillierter ansehen will. Zirka drei Stunden wird die Messung dauern. Hinterher wird man auf den Nanometer genau sehen, wo die Fluoreszenzmarker leuchten, mit denen er die Probe versehen hat.

Für diese Art der Mikroskopie benötigen die Forscher schaltbare Fluoreszenzfarbstoffe. Zunächst sind die Moleküle ausgeschaltet: Sie befinden sich in einer Art

Dornröschenschlaf, in dem sie sich nicht anregen lassen. Erst Aktivierung mit Licht ändert ihre chemische Struktur, woraufhin sie ein Laser passender Wellenlänge zum Leuchten bringen kann. Für präzisere Aufnahmen ersinnt ein Team von Chemikerinnen und Chemikern in Hells Heidelberger Labor ausgeklügelte Schaltmechanismen. Die meisten solcher Techniken konzentrierten sich bislang darauf, bei der Aktivierung bestimmte chemische Gruppen abzuspalten oder Ringe aus Atomen zu öffnen. In einem neuen Ansatz ging ein Team aus Hells Abteilung 2021 den umgekehrten Weg und schuf eine Gruppe von Molekülen, die durch Lichtaktivierung einen zusätzlichen Ring im Molekül schlossen. Diese Farbstoffe bleichen nicht so schnell aus und sind langlebiger, was für die Messung von Vorteil ist.

Nur Millisekunden dauert es, wenn das Kinesin-Molekül einen Fuß vor den anderen setzt. Den Mechanismus genau zu untersuchen, ist daher schwierig. Zwar ist der molekulare Transporter laut Jessica Matthias das wohl am besten untersuchte Motorprotein in der Zelle, trotzdem sind manche Details des Bewegungsablaufs noch nicht geklärt.

Bislang ließ es sich mit zwei Methoden beobachten: Bei der einen heftete man Nanokügelchen an die Kinesin-Moleküle und hielt sie mit Hilfe fokussierter Laserstrahlen – einer so genannten optischen Pinzette – fest. Indem man die Kraft maß, die auf die Kügelchen wirkte, konnte man auf die Bewegung des Proteins schließen. So hat man in den letzten Jahren herausgefunden, dass Kinesin sich stückweise um jeweils acht Nanometer vorwärtsbewegt und dazwischen kurz innehält. 2021 beobachtete eine Gruppe um Erik Schäffer, Professor für zelluläre Nanowissenschaften an der Universität Tübingen,

gen, dass diese Schritte in Zwischenschritten von vier Nanometern aufgeteilt sind.

Doch solche Messungen zeigen stets nur, wie sich der Schwerpunkt des Moleküls bewegt. Wie sich die Füße genau verhalten, ist unklar – denn die Kügelchen, die man verfolgt, sind mit rund 80 Nanometern Durchmesser im-

mer noch riesengroß gegenüber den etwa 2 Nanometer winzigen Kinesinfortsätzen. Bei der anderen Methode befestigt man daher kleine Fluorophore an speziellen Stellen des Proteins. Eine solche Aufnahme dauerte aber mehrere hundert Millisekunden, und so ließen sich die sehr raschen Bewegungen bislang nicht richtig beobachten.

Jenseits der Beugungsgrenze

Um Strukturen in lebenden Organismen sichtbar zu machen, arbeitet die Biologie mit Fluoreszenzmarkern: Farbstoffen, die sich an spezifische Strukturen in einer Zelle binden und nach Anregung mit Licht einer bestimmten Wellenlänge leuchten.

Eine natürliche Grenze beschränkt die Auflösung solcher Bilder: Durch die Beugung des Lichts lassen sich zwei Objekte, die dichter als etwa die halbe Wellenlänge des emittierten Lichts beieinanderliegen, nicht mehr getrennt voneinander wahrnehmen. Weil sichtbares Licht zwischen 400 und 700 Nanometer Wellenlänge besitzt, liegt die Grenze bei rund 200 bis 300 Nanometern. Seit den 1990er Jahren haben Wissenschaftler Verfahren erdacht, um diese natürliche Auflösungsgrenze auszutricksen. Alle haben eins gemeinsam: Sie sorgen über das An- und Ausschalten der Fluoreszenz dafür, dass nur wenige Moleküle gleichzeitig leuchten.

STED

Die von Stefan Hell entwickelte Technik beruht auf Verhinderung der Fluoreszenz durch stimulierte Emission (englisch: Stimulated Emission Depletion).

Wie in der klassischen Mikroskopie regt ein Laserstrahl Fluoreszenzmoleküle in einem bestimmten Bereich zum Leuchten an. Ein weiterer, »donutförmiger« Laserstrahl nimmt durch stimulierte Emission allen Molekülen die Fluoreszenzfähigkeit weg – außer denen, die sich in einem sehr kleinen Bereich in der Mitte des »Donuts« befinden. Je kleiner dieser Bereich um die Nullstelle des STED-Lasers ist, desto weniger Moleküle können gleichzeitig leuchten und desto schärfer ist das Bild. Mit solch einer Kombination aus An- und Ausschaltstrahl wird die Probe systematisch abgetastet.

PALM/STORM

Hier sind die Fluoreszenzmoleküle anfangs aus, also in einem Zustand, in dem sie bei Bestrahlung mit Anregungslicht nicht fluoreszieren können. Beim Einschalten wird die Probe zuerst mit Anschaltlicht so

schwach beleuchtet, dass statistisch höchstens ein Molekül innerhalb der Beugungsgrenze von 200 bis 300 Nanometern angeschaltet wird, räumlich völlig zufällig. Die zunächst unbekannt Position der angeschalteten Moleküle bestimmt man anschließend anhand des Beugungsmusters, das durch die Fluoreszenz einzelner Moleküle auf einer Kamera entsteht. Dabei wird das Maximum (oder der »Schwerpunkt«) des Beugungsmusters gleichgesetzt mit der auf die Fokalebene herunterprojizierte Position des Moleküls. Das nennt man »Lokalisieren«. Danach werden die so registrierten und lokalisierten Moleküle ausgeschaltet und eine Runde neuer Moleküle eingeschaltet.

Bei diesem PALM (»Photo-Activation Localization Microscopy«, etwa »Mikroskopie durch Photoaktivierung und Lokalisierung«) oder STORM (»Stochastic optical reconstruction microscopy«, etwa »stochastische optische Rekonstruktionsmikroskopie«) genannten Verfahren verwendet man also Fluoreszenzmoleküle, die sich aktiv schalten lassen oder sich spontan an- und ausschalten (»blinken«). Während das sequenzielle An- und Ausschalten einzelner Moleküle ihre Trennung erlaubt, verrät das Auffinden der Mitte ihres Beugungsmusters ihre Position. Wendet man das auf (fast) alle Moleküle in der Probe an, erhält man ein scharf aufgelöstes Bild. Die Auflösung ist vergleichbar mit der von STED-Bildern.

MINIFLUX

MINIFLUX vereint Elemente aus dem STED-Verfahren und den stochastischen Ansätzen. Wie in PALM/STORM verwendet man Moleküle, die sich wiederholt an- und ausschalten lassen. Zunächst wird statistisch maximal ein Fluoreszenzmolekül pro Beugungsbereich aktiviert – das heißt, in einen Zustand gebracht, in dem es bei entsprechender Beleuchtung mit Anregungslicht fluoreszieren kann. Entscheidend ist, dass dann ein Anregungsstrahl mit einer Nullstelle in der Mitte – also ein donutförmiger Laser wie bei STED, doch diesmal zum Anregen – die Probe Stück für Stück abtastet. Die Position des Donuts und damit der Donut-Nullstelle steuert man auf weniger als einen Nanometer genau, weshalb sie immer exakt bekannt ist.

Befindet sich ein Fluorophor direkt in der Mitte des Anregungsstrahls, bleibt das Molekül dunkel, denn dort ist die Intensität des Anregungsstrahls null. In

Lukas Scheiderer und Otto Wolff haben die winzigen Bewegungen in ihrer Doktorarbeit jetzt erstmals in Echtzeit sichtbar gemacht – das heißt unter der üblichen ATP-Konzentration einer lebenden Zelle und damit bei der Geschwindigkeit, mit der das Transportmolekül dort voranschreitet. Dazu brachten sie kleine Fluoreszenzmar-

diesem Fall hat man die Position des Fluoreszenzmoleküls genauestens herausgefunden, weil sie mit der exakt bekannten Position der Donut-Nullstelle identisch sein muss. Liegt die Nullstelle aber knapp neben dem Molekül, so glimmt es schwach. Weil die Intensität des Anregungslasers zum Donutring hin ansteigt, verrät die Zahl der emittierten Photonen den Abstand des Moleküls zur Nullstelle und somit die Position des Moleküls: Je schwächer es leuchtet, desto enger sind die beiden zusammen. Im MINFLUX-Verfahren tastet der donutförmige Anregungsstrahl die Probe Stück für Stück ab und optimiert dabei auf minimale Fluoreszenz per eingestrahelter Laserleistung. Je besser man es schafft, die Nullstelle mit dem Molekül räumlich zu überlappen, umso genauer lässt sich dessen Ort bestimmen. Die Wissenschaftler erhalten auf diese Weise hochpräzise Molekülpositionen. In Verbindung mit dem sequenziellen An- und Ausschalten aller Fluorophore erreichen die Bilder Auflösungen von 1 bis 3 Nanometer, also auf Molekülgröße.

MINSTED

MINSTED kombiniert ebenfalls die Stärken der Einzelmolekülmikroskopie mit der genauen Lokalisation des STED-Verfahrens. Anders als bei MINFLUX kommen jedoch ein An- sowie ein Ausschaltlaser (STED) zum Einsatz.

Auch hier verwendet man schaltbare Fluoreszenzmoleküle. Zunächst wird durch stochastisches Anschalten ein Molekül pro Auflösungsgrenze aktiviert. Das Abtasten der Probe funktioniert gleich wie bei Minflux, aber mit einem Laseraufbau wie bei STED: einem Anregungsstrahl und einem donutförmigen Ausschaltstrahl. Die Intensität eines Fluoreszenzmoleküls ist demnach dann am größten, wenn das Zentrum des Donuts sich direkt über ihm befindet. Da man die Beziehung zwischen Abstand von der Nullstelle und Intensität kennt, erfolgt die Lokalisation hier ebenfalls durch diese Beziehung. Mit MINSTED kann man die leuchtenden Moleküle heute bis auf wenige Ångström, also Zehntelnanometer, lokalisieren.

ker an den Füßen an und verfolgten deren Position mit einem MINFLUX-Mikroskop.

Das Ergebnis lässt sich am Computer sehen: Jessica drückt auf »Play« und von links nach rechts füllt sich das Bild mit Punkten in Hell- und Dunkelblau, Türkis, Grün und Gelb. Es sind die »Fußspuren« verschiedener Kinesin-Moleküle, Schritt für Schritt. Jede Farbe zeichnet eine imaginäre horizontale Linie nach; die Transportproteine laufen brav die einzelnen Mikrotubuli entlang, wie Loks auf verschiedenen Gleisen. Bis auf eines, das zwischen durch die Fahrspur wechselt (siehe »Fußspuren«).

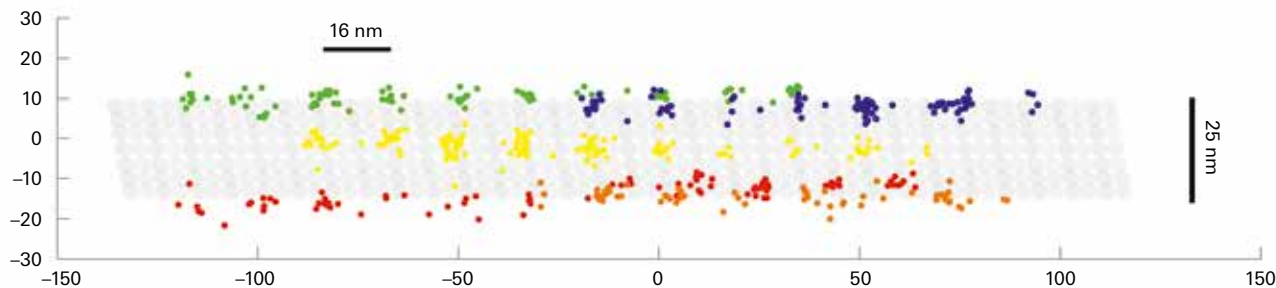
Für die Messung hat das Team einen speziellen Aufbau ersonnen: Statt des »Donuts« haben sie zwei »Brötchen« verwendet. Das klingt wie ein Witz, aber die Begriffe werden in der Topologie vollkommen ernsthaft benutzt. Beim »Brötchen« ist die Nullstelle anders als beim »Donut«: Statt eines Lochs in der Mitte des kreisförmigen Laserstrahls teilt eine waagrechte Linie ihn in eine obere und eine untere Hälfte. Dank der neuen Geometrie steigt die Intensität des Lasers von der Nullstelle zum Maximum hin schneller an. Damit wird die Nullstelle präziser.

Zwei Brötchen statt eines Donuts

Um dem Kinesin bei seinem Gang über die Mikrotubuli zuzusehen, haben die Heidelberger Physiker zwei solcher Brötchen-Laser orthogonal zueinander ausgerichtet und in Millisekundenschnelle zwischen ihnen hin- und hergeschaltet. Dadurch schrumpfte die nicht beleuchtete Stelle auf ein kleines Quadrat dort, wo sich die Nullstellen der beiden Laser überlappen. Im Einklang mit bisherigen Erkenntnissen sahen sie, dass zwei aufeinanderfolgende Schritte das Molekül um insgesamt 16 Nanometer vorwärtsbrachten. Jeder Schritt sollte dabei laut früheren Studien 8 Nanometer betragen. In ihren Messungen sahen Scheiderer und Kollegen jedoch ein anderes Muster: Schritte von 6 und 10 Nanometer Länge wechselten sich ab. Das führten sie darauf zurück, dass ihr Fluoreszenzmarker an einem der umeinandergewickelten Stränge angebracht war und damit nicht genau in der Mitte des Proteins saß: Befand sich gerade der Fuß vorn, an dessen Strang der Fluorophor saß, war der Fluoreszenzmarker von der Molekülmitte aus um 2 Nanometer nach vorn versetzt; beim nächsten Schritt befand er sich hingegen 2 Nanometer hinter der Molekülmitte. Das bestätigten die Fachleute, indem sie zwei identische Fluoreszenzmarker an beiden Proteinsträngen anhefteten: Nun sahen sie das erwartete Muster von 8 Nanometern Länge.

»Ein Fluoreszenzmikroskop sieht Fluoreszenzmoleküle. Nichts anderes«, sagt Hell plakativ (siehe Interview bei »Spektrum Plus«, online). Die Auflösung der Mikroskope ist jetzt an einem Punkt, an dem die Größe der Fluoreszenzmarker und ihr Abstand zu den Strukturen, die man eigentlich sichtbar machen möchte, zum Tragen kommt. Oder, anders gesagt: Die leuchtenden Moleküle selbst sind plötzlich der limitierende Faktor.

Das hat Hell mit seiner anderen Forschungsgruppe im November 2022 eindrucksvoll gezeigt. Der Wissenschaftler forscht an zwei Standorten: Außer seinem Team in



FUSSSPUREN Das Motorprotein Kinesin bewegt sich mit winzigen, immer gleichen Schritten entlang zellulärer Strukturen. Die Heidelberger Wissenschaftler haben es Schritt für Schritt dabei beobachtet. Jede Farbe steht für ein anderes Kinesin-Molekül.

Heidelberg leitet er gleichzeitig eines am Göttinger Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften. Dort wurden jetzt Fluoreszenzmoleküle bis auf gut zwei Ångström genau verortet. Ein Ångström ist ein Zehntelnanometer – so groß sind einzelne Atome.

Das gelang ihnen mit einer Technik namens MINSTED, welche sie 2021 in der Zeitschrift »Nature Photonics« vorstellten. Wie bei MINFLUX verwendet man dazu schaltbare Fluoreszenzmoleküle und aktiviert zufällig einzelne von ihnen; anschließend verortet man sie nicht nur mit einem Laser, der die Moleküle anschaltet, sondern wie bei STED mit einer Kombination aus An- und Ausschaltstrahl (siehe »Jenseits der Beugungsgrenze«). Bislang erreichte man so Auflösungen von 1 bis 3 Nanometer.

Bei der STED-Mikroskopie wählt man die Photonen des ausschaltenden Strahls möglichst energiearm, das heißt im roten oder nahinfraroten Wellenlängenbereich. Daher liegen gängige STED-Laser bei einer Wellenlänge von 775 Nanometern. So will man sicherstellen, dass die Photonen des »Ausschaltstrahls« nur ausschalten – und nicht versehentlich andere Moleküle zum Leuchten anregen und so das Signal verfälschen. Die rotverschobene Wellenlänge hat aber auch zur Folge, dass das Ausschalten durch STED weniger effizient ist und man einen intensiveren Strahl braucht.

Dank der schaltbaren Fluoreszenzmarker ist es bei MINSTED jedoch nicht mehr notwendig, den STED-Laser

auf den roten Bereich zu limitieren. Denn innerhalb des beleuchteten Flecks ist statistisch nur ein einzelner Fluorophor aktiv, alle anderen befinden sich in ihrem Dornröschenschlaf und reagieren nicht, wenn der STED-Strahl sie trifft. So kann der Laser keinen zufällig zum Leuchten bringen. Also verschob Hell die Wellenlänge des STED-Strahls zu kürzeren (»blauverschobenen«) Wellenlängen.

Damit ließ sich plötzlich das volle Potenzial der Fluoreszenz ausschöpfen: Das Hintergrundleuchten entfiel durch die schaltbaren Farbstoffe, und indem die Forscher den Laser bei kürzeren Wellenlängen betrieben, benötigten sie deutlich schwächere STED-Strahlen. Das Resultat sind Aufnahmen mit wenigen Ångström Präzision.

Hell sprüht vor Begeisterung, als er von diesem Durchbruch erzählt. »Ångström-Präzision bei Raumtemperatur! Dass das funktioniert, hätte man nicht gedacht«, jubelt der Forscher. Sein Team hat sich mit dem neuen Verfahren Kernporenkomplexe angesehen – jene Proteinkomplexe, die bereits als großformatige Aufnahme mit 20 Nanometer Auflösung bei Hell in Heidelberg im Gang prangen.

Die Vielfalt der Natur, nanometergenau

»Wir haben die Proteine mit Nanobodies markiert, an denen wiederum unsere Fluorophore gebunden waren,« erklärt Michael Weber aus Hells Göttinger Forschungsgruppe. »Davon haben wir ein hochaufgelöstes Bild erhalten. Und da wir die Größe der Nanobodies kennen, können wir über die Bilder zurückrechnen, wo das Protein liegen kann.« Auf 2,3 Ångström genau vermessen er und sein Teamkollege Henrik von der Emde auf diese Weise die Position der Fluorophore. Ihre Ergebnisse haben sie mit elektronenmikroskopischen Aufnahmen des Kernporenkomplexes verglichen, die Kollegen im Juli 2022 in der Fachzeitschrift »Science« veröffentlicht haben. »Das passt hervorragend«, freut sich der Forscher.

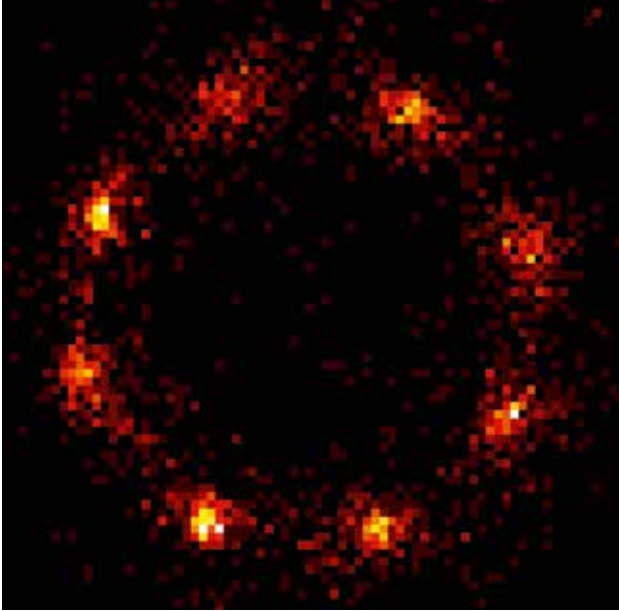
Doch die Bilder der fluoreszierenden Marker offenbaren noch mehr. In der durchschnittlichen Kernpore sind acht spezielle Proteine regelmäßig im Kreis angeordnet. Eine Überlagerung von 81 Fluoreszenzaufnahmen zeigt diese Regelmäßigkeit wie aus dem Biologielehrbuch (siehe »Passt perfekt«). Auf den einzelnen Aufnahmen sieht man dagegen die ganze Vielfalt der Natur: Jede Pore ist individuell, manche sind leicht oval, keine gleicht der anderen exakt (siehe »Individuen«). Möglicherweise werden Fachleute in naher Zukunft mit Lichtmikroskopen feine Strukturen aufklären – nur, dass sie statt gemittelter Werte individuelle Strukturen sehen können.



SHINTARTANYA / STOCK.ADOBE.COM

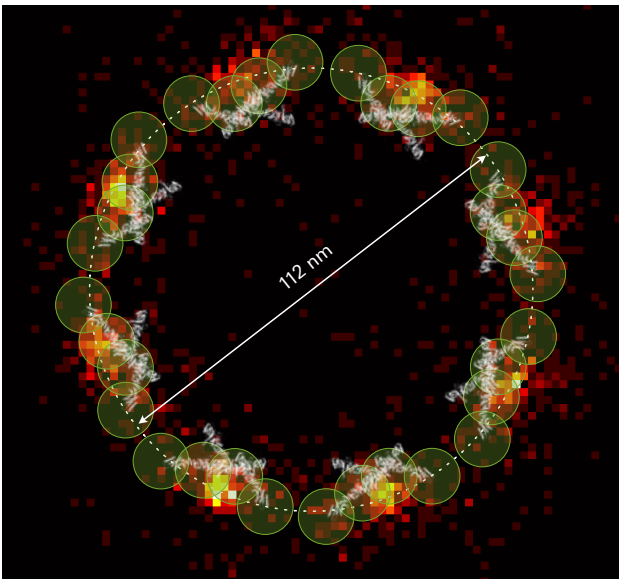
Mehr Wissen auf Spektrum.de

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



KERNPORE Die mit MINSTED erhaltenen Bilder von Hells Forschungsteam in Göttingen zeigen im Detail, dass acht Exemplare des Kernporenproteins NUP96 ringförmig angeordnet sind. Hier wurden 81 Bilder übereinandergelegt, so dass sich im Mittel eine ideale Kreissymmetrie ergibt.

PASST PERFEKT Der Abgleich mit Strukturinformationen aus der Kryo-Elektronenmikroskopie zeigt eine extrem hohe Übereinstimmung.



Die Stärke der Lichtmikroskopie lag schon immer in der Fähigkeit, Lebendes zu beobachten. Neben dem ultrascharfen Blick auf individuelle Proteine, den MINSTED jetzt ermöglicht, liegt eine große Chance sicher in der schnellen Beobachtung kleinster Bewegungen, wie sie die Forschungsgruppe im Heidelberger Institut erstmals durchgeführt hat. Die Experimente am Kinesin liefern zwar nicht in einer lebenden Zelle, sondern im Reagenzglas, aber unter physiologischen ATP-Konzentrationen. Das Protein bewegte sich demnach realistisch schnell. Durch Messungen der ATP-Konzentration während der

Aufnahmen hat das Team außerdem herausgefunden, warum das Molekül in der Mitte eines Schritts pausiert, dieser sich also in zwei Zwischenschritte von je 4 Nanometern unterteilen lässt: Hier wird das Protein mit dem Treibstoff beladen. Anschließend schwingt der Fuß nach vorn, ATP wird gespalten, und der Fuß setzt ab.

In solchem Detail war der Mechanismus noch nicht bekannt. Und jetzt bleibt lediglich die Frage offen: Dreht sich das Molekül dabei mal nach links, mal nach rechts – oder immer gleich, wie ein Walzer tanzender Mensch? Auch das glauben die Heidelberger herausgefunden zu haben: »Der Fuß scheint immer nach rechts auszuschlagen«, sagt Lukas Scheiderer. »Das spricht dafür, dass es sich wie ein Tänzer verhält«, ergänzt Jessica Matthias.

»Es wird in den nächsten Jahren zahlreiche Studien geben, die sich andere Proteindynamiken ansehen«, prognostiziert die biophysikalische Chemikerin, und sagt ganz unbescheiden: »Wir haben eine neue Domäne eröffnet.« Das sieht auch Hell so. Seiner Ansicht nach ist die Messung des Kinesins der Anfang einer Ära, in der Forscherinnen und Forscher kleinste Bewegungen von Molekülen in Echtzeit nachverfolgen. »Das ist ein Gamechanger«, ist sich der Nobelpreisträger sicher, »weil es eine komplett neue Art ist, die Position von Biomolekülen zu bestimmen«. Er erwartet, dass die Technik in fünf bis zehn Jahren auch in der Medikamentenentwicklung angewandt wird, wo sie Wechselwirkungen zwischen Wirkstoff und Zielstruktur sichtbar machen kann. Hell ist überzeugt: »Kinesin öffnet der Community erst einmal nur die Augen«.

Im Raum nebenan schlummert ein weiteres Gerät, mit schwarzen Planen abgeschirmt vor den Augen der neugierigen Besucherin. Was es damit auf sich hat, will niemand verraten. Vielleicht werden wir schon bald darüber lesen. ◀

QUELLEN

Hell, S.W., Wichmann, J.: Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: Stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy. *Optics Letters* 19, 1994

Lincoln, R. et al.: A general design of caging-group-free photoactivatable fluorophores for live-cell nanoscopy. *Nature Chemistry* 14, 2022

Weber, M. et al.: MINSTED nanoscopy enters the Ångström localization range. *Nature Biotechnology* 2022, doi: 10.1038/s41587-022-01519-4 (Open Access)

Wolff, J.O. et al.: MINFLUX dissects the unimpeded walking of kinesin-1. *BioRxiv* 2022, doi: 10.1101/2022.07.25.501426 (Open Access)



Stefan Hell im Interview

spektrum.de/plus/2081691

TUMOREN

Komplexe Lebensgemeinschaften

Krebsgeschwulste bestehen aus diversen Zelltypen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften. Das erklärt, warum Krebserkrankungen so schwer zu behandeln sind, und eröffnet andererseits neue Therapieansätze.

► Krebserkrankungen entstehen, wenn das Erbgut an kritischen Stellen mutiert und die betroffenen Zellen daraufhin entarten. Seit einigen Jahren erkennen Mediziner allerdings immer deutlicher, dass nicht nur Genmutationen die Entwicklung eines Tumors prägen. Veränderte Genaktivitäten scheinen hier ebenfalls eine maßgebliche Rolle zu spielen – insbesondere bei der Metastasierung, dem Entstehen von Tochtergeschwülsten in anderen Organen. Kehrt die Krankheit nach einer Krebstherapie zurück, beruht dies nicht nur auf mutierten Tumorzellen, die gegen die Behandlung resistent geworden sind. Auch die vorübergehende, reversible Umwandlung entarteter Zellen wirkt daran mit, wie Studien gezeigt haben. Dabei begeben sich einige Krebszellen in einen Zustand, in dem sie die Therapie überstehen, um später wieder aktiv zu werden. Tumoren können demnach aktiv und dynamisch auf Einflüsse von außen reagieren, ohne dabei irreversibel zu mutieren.

Erste Belege für solche nicht genetischen Anpassungsprozesse tauchten auf, als Mediziner feststellten: Zellen von Darm- und Lungentumoren verwandeln sich unter Chemotherapie manchmal in ein stammzellähnliches Stadium zurück. Sie machen dabei eine epithelial-mesenchymale Transition (EMT) durch, einen Vorgang, der während der Embryonalentwicklung die Bildung verschiedener Gewebearten steuert. Eine Arbeitsgruppe um den Hautarzt Thomas Tüting von der Universität Magdeburg hat das Phänomen ebenfalls an Mäusen beobachtet, die an einem Melanom (»Schwarzer Hautkrebs«) erkrankt waren. Wurden

die Tiere immuntherapeutisch behandelt, veränderten die Tumorzellen ihr Aussehen und »entdifferenzierten« sich: Sie verloren ihre für Pigmentzellen typischen Merkmale, entwickelten stattdessen embryonale Eigenschaften und entkamen so dem Angriff des Immunsystems. Fachleute nehmen mittlerweile an, dass dies ein Bestandteil der so genannten phänotypischen Plastizität ist (siehe »Spektrum« Oktober 2022, S. 34), also der Fähigkeit von Organismen einschließlich Krebszellen, ihr Erscheinungsbild zu verändern, um auf Umwelteinflüsse zu reagieren. Dabei können die Tumorzellen einen grundlegenden Identitätswechsel durchlaufen, der mit einer Aktivitätsänderung hunderter Gene einhergeht.

Zwei Zellsorten

Einen tieferen Einblick darin hat der Onkologe Keith Hoek vom Universitätsspital Zürich im Jahr 2006 gewonnen, als er die Genexpressionsprofile dutzender Melanom-Zelllinien miteinander verglich. Er stellte fest, dass er die Zellen unabhängig von ihren genetischen Mutationen einer von zwei Gruppen zuordnen konnte. Entweder einem »differenzierten proliferativen« Phänotyp, der Merkmale von Pigmentzellen trug und sich schnell vermehrte, oder einem »entdifferenzierten invasiven« Zustand, bei dem die Zellen ihre gewebetypischen Eigenschaften verloren hatten und dazu neigten, aus ihrem Ursprungsgewebe abzuwandern und in andere Körpergewebe einzudringen. Hoek schloss daraus: Damit ein Tumor wachsen und sich vervielfältigen kann, müssen seine Zellen zwischen beiden Zuständen hin- und herwechseln können. Der »Wanderungs- und

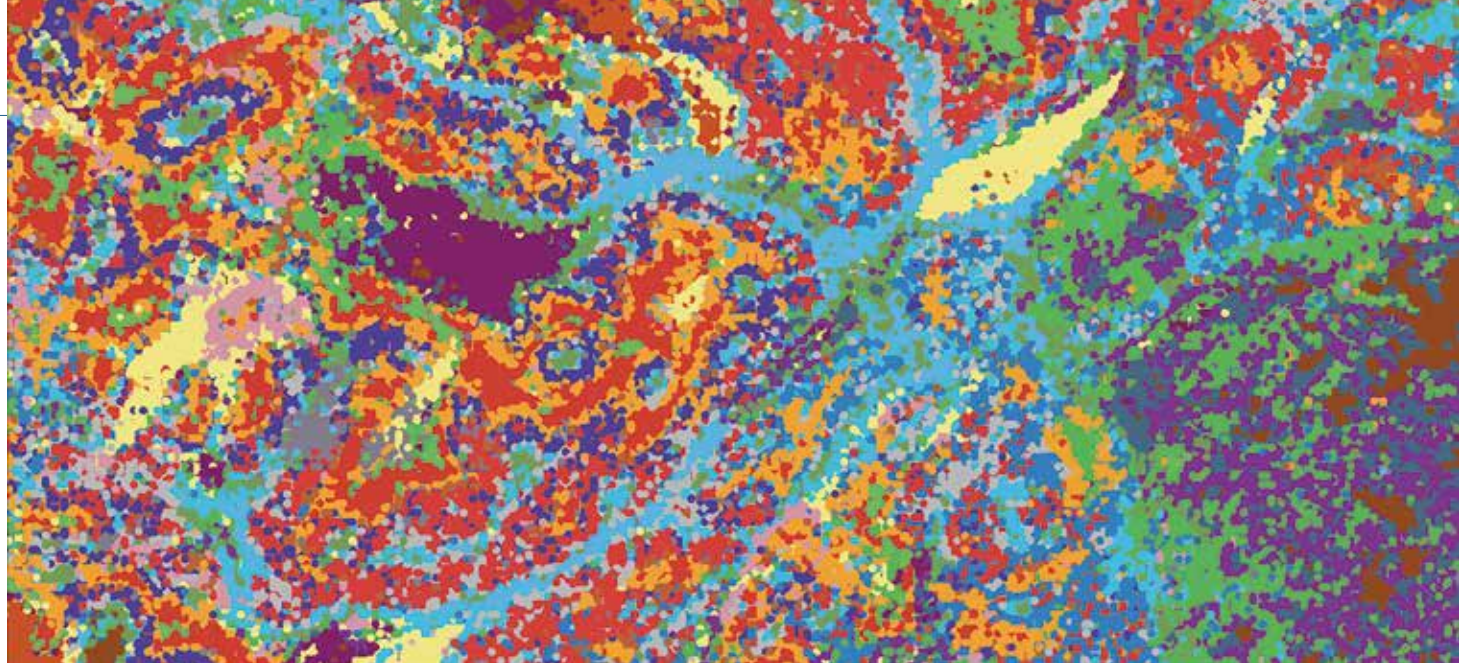
Eindringmodus« erlaubt es ihnen, sich vom Primärtumor zu lösen. Sind sie erfolgreich in ein anderes Körperorgan eingedrungen, müssen sie erneut in das proliferative Verhalten umschalten, um sich zu vermehren. Hoek und seine Kollegen bezeichneten das als »phenotype switching«.

Melanomzellen können sogar mehr als zwei Zustände annehmen, wie Studien mittlerweile ergeben haben. Ein Forschungsteam um Jennifer Tsoi von der University of California in Los Angeles wies 2018 nach, dass Melanome sich während einer Krebstherapie manchmal in vier aufeinander folgenden Stufen entdifferenzieren, bis sie schließlich eine

Glossar

sc-RNA-seq: Die Methode erlaubt es herauszufinden, welche Gene in einer einzelnen Zelle aktiv sind. Hierzu werden die RNA-Moleküle dieser Zelle, also die »Genabschriften«, analysiert.

Prä-EMT-Zustand: Diesen Zustand haben Stammzellen, die noch auf keinen bestimmten Gewebetyp festgelegt sind. Sobald sie eine Umwandlung namens EMT (epithelial-mesenchymale Transition) durchmachen, fangen sie an, sich auf bestimmte Gewebetypen zu spezialisieren, und befinden sich dann nicht mehr im Prä-EMT-Zustand.



ÖKOSYSTEM TUMOR Studien belegen: Melanome bestehen aus mindestens sieben verschiedenen Zellsorten (hellblau: Blutgefäße).

stammzellähnliche Beschaffenheit annehmen, die beinahe jeglicher Behandlung widersteht.

Ob »phenotype switching« im klinischen Alltag eine bedeutsame Rolle spielt und inwieweit die verschiedenen Zellzustände innerhalb eines Tumors nebeneinander bestehen, ließ sich lange Zeit nur schwer beantworten. Seit einigen Jahren gelingt dies dank neuer Verfahren immer besser. So erlaubt es die Methode des »single-cell RNA-sequencing« (»sc-RNA-seq«, deutsch: RNA-Sequenzierung auf Einzelzellenebene), jene Gene zu identifizieren, die in einer einzelnen Zelle zu einem bestimmten Zeitpunkt aktiv sind.

2016 wurden damit erste Daten von menschlichen Hauttumoren gewonnen. Eine Forschungsgruppe um Levi Garraway vom MIT in Cambridge sequenzierte die RNA-Moleküle von knapp 5000 Tumorzellen menschlicher Melanome. Eine Herkulesarbeit, die belegte, dass sowohl der differenzierte proliferative als auch der entdifferenzierte invasive Zelltyp gleichzeitig im selben Tumor vorkommen. Darüber hinaus wiesen die Forscher Zellen mit normalen Genexpressionsmustern nach, etwa jenen von Endothel- oder Immunzellen, die aber zu festen Bestandteilen

des Tumors geworden waren und seine Weiterentwicklung unterstützten. Eine bestimmte Sorte von Bindegewebszellen beispielsweise schaltete eindringende T-Lymphozyten aus und schützte so die anderen Tumorbestandteile vor Immunangriffen.

Kürzlich hat ein Team um Jean-Christophe Marine vom Flämischen Institut für Biotechnologie (Belgien) weitere Erkenntnisse hierzu gewonnen. Als die Forscherinnen und Forscher rund 30000 einzelne Zellen aus Mäuse-Melanomen entnahmen und diese per sc-RNA-seq untersuchten, identifizierten sie sieben unterschiedliche Typen. Am häufigsten trat der differenzierte proliferative Phänotyp auf. Auch der entdifferenzierte invasive war vertreten, nebst verschiedenen Übergangszuständen dazwischen. Zudem ließ sich ein ultraentdifferenzierter Typ erkennen, der keinerlei Differenzierung aufwies und den Wissenschaftler als »Prä-EMT-Zustand« bezeichnen.

Zurück zum Urzustand

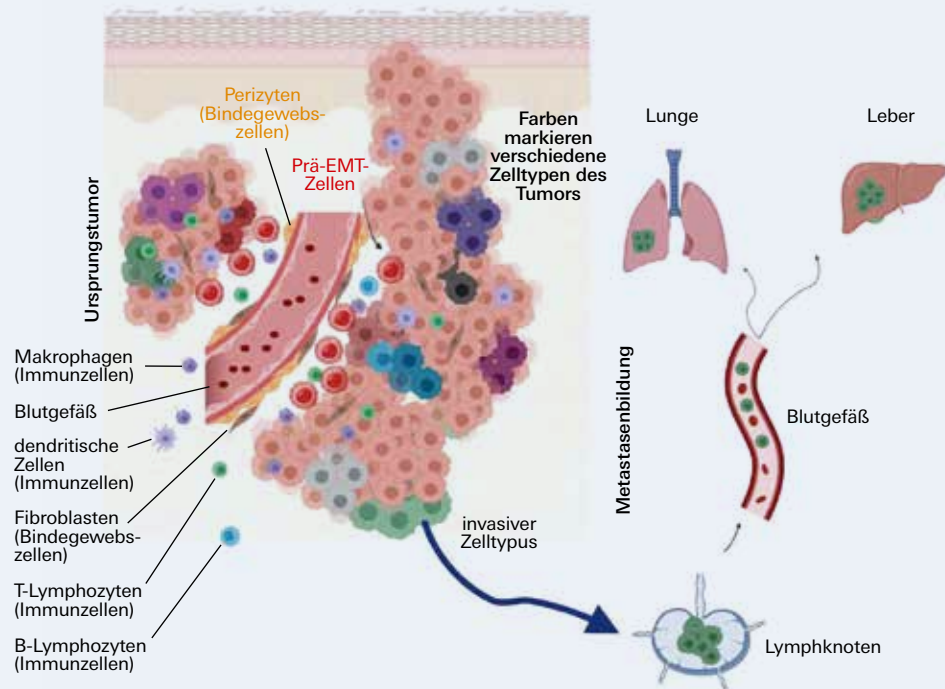
Melanozyten, die zu den Pigmentzellen zählen, gehen während der Embryonalentwicklung aus der Neuralleiste hervor – einer vorübergehend existierenden Struktur, die außer den Pigmentzellen ebenso das periphere Nervensystem sowie einige Muskeln und Knochen produziert. Die Stammzellen, die all diese Gewebetypen hervorbringen, gehören zum Prä-EMT-Typ. Sobald sie

eine EMT durchlaufen haben, werden sie mobil, verlassen die Neuralleiste und fangen an, sich zu spezialisieren. Im Zuge dieses Vorgangs gelangen beispielsweise Melanozyten-Vorläufer in die Haut oder in die Haarfollikel, wo sie zu ortsansässigen Melanozyten ausreifen. Aus den Studien der Forschungsteams um Levi Garraway und Jean-Christophe Marine geht somit hervor: Manche Tumorzellen aus Melanomen verwandeln sich in den mobilen Zwischenzustand und sogar in den Prä-EMT-»Urzustand« zurück. Zellen des letzteren Typs machten in den Untersuchungen zwar nur wenige Prozent aller Krebszellen aus, allerdings sind sie für das Fortbestehen des Tumors wohl enorm wichtig. Denn Stammzellen, die noch auf keinen bestimmten Gewebetyp festgelegt sind (so genannte pluripotente Stammzellen) sind nicht nur fähig, verschiedenste Zelltypen zu erzeugen, sondern auch sehr robust und widerstandsfähig. Daher nehmen die Forscher an, dass vor allem die Prä-EMT-Zellen den gängigen Therapien widerstehen und einen Tumor immer wieder mit Nachschub versorgen.

Weiteren Untersuchungen zufolge sitzen die Prä-EMT-Zellen in unmittelbarer Nähe von Blutgefäßen. Die Daten lassen vermuten, dass die dortigen Endothelzellen einige Tumorzellen des Melanoms dazu anregen, sich in den Prä-EMT-Zustand zurückzusetzen. Melanomzellen

Verhängnisvolle Rückverwandlung

Endothelzellen von Blutgefäßen können in der Nähe liegende Tumorzellen vermutlich dazu anregen, sich in einen Prä-EMT-Urzustand zurückzusetzen. Dieser ist äußerst therapieresistent. Ein weiterer Typus Tumorzelle, der invasive Phänotyp, neigt hingegen zum Abwandern aus dem Ursprungsgewebe und zum Eindringen in andere Körperregionen und bringt so Metastasen hervor.



MIT FRIEDRICH VON JEAN-CHRISTOPHE MARINE, ICB-KU LEUVEN CENTER FOR CANCER BIOLOGY; BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

im entdifferenzierten invasiven Zustand hingegen tendierten erwartungsgemäß dazu, sich vom Primärtumor zu lösen und in andere Körpergewebe vorzudringen. Sie waren in benachbarten Lymphknoten nachweisbar sowie in der Lunge und Leber der krebserkrankten Labormäuse. Sobald sie ihr Ziel erreicht haben und manchmal sogar noch während der Wanderung dorthin, geben sie laut den sc-RNA-seq-Daten den invasiven Phänotyp auf und wechseln in den proliferativen, der die Zellvermehrung ermöglicht. Spätestens vier Wochen, nachdem die ersten wandernden Zellen ansässig geworden sind, hat eine Lungenmetastase demnach ihre invasive Zellpopulation komplett zu Gunsten einer proliferativen verloren. Das von Hoeck postulierte »phenotyp switching« ist also real.

Schon frühere Forschungsergebnisse von Marine hatten darauf hingedeutet: Zellen, die sich im differenzierten proliferativen Zustand befinden, versetzen sich unter Stressbedingungen wie Sauerstoff- oder Nährstoffmangel in einen Notstatus (der in den sc-RNA-seq-Daten als

Zwischenzustand zu erkennen ist). Wird die Belastung extrem, etwa unter den Einwirkungen einer Krebsimmuntherapie, können die Zellen aus dem Notstatus heraus in den invasiven oder den Prä-EMT-Zustand wechseln, was sie therapieresistent macht. In dieser Form überdauern sie, bis die Gefahr vorüber ist. Nach einiger Zeit werden sie erneut aktiv, um das Tumorwachstum beziehungsweise die Metastasierung wieder voranzutreiben.

Die Erkenntnisse erklären, warum Krebserkrankungen nach einer Therapie häufig wiederkehren, ohne dass sich das auf neue Mutationen zurückführen ließe. Darüber hinaus deuten sie auf mögliche neue Behandlungsansätze hin. Schon die Gruppe von Jennifer Tsoi hatte festgestellt, dass entdifferenzierte Melanomzellen anfälliger sind für die Ferroptose (siehe »Spektrum« Oktober 2019, S. 24) – eine Variante des Zelltods, an der Eisen mitwirkt und die man mit Medikamenten auslösen kann. Das Team um Marine hat jetzt einen Zellrezeptor gefunden, der auf Signale von Endothelzellen reagiert und an der Rück-

verwandlung in den Prä-EMT-Zustand beteiligt ist. Blockiert man ihn, kann die Zelle den Prä-EMT-Zustand möglicherweise nicht mehr annehmen, was das Tumorwachstum beeinträchtigen würde. Ließe sich das medizinisch nutzen, könnten daraus bessere Krebstherapien erwachsen. ◀

Emmanuelle Vaniet ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.

QUELLEN

Karras, P. et al.: A cellular hierarchy in melanoma uncouples growth and metastasis. *Nature* 610, 2022

Rambow, F. et al.: Melanoma plasticity and phenotypic diversity: therapeutic barriers and opportunities. *Genes & Development* 33, 2019

Tirosh, I. et al.: Dissecting the multicellular ecosystem of metastatic melanoma by single-cell RNA-seq. *Science* 352, 2016

Tsoi, J. et al.: Multi-stage differentiation defines melanoma subtypes with differential vulnerability to drug-induced iron-dependent oxidative stress. *Cancer Cell* 33, 2018

Hochtemperatursupraleitung unter der Lupe

Dank eines neuen Experiments können Physiker die Elektronen in supraleitenden Cupraten vermessen – und so eine 35 Jahre alte Theorie bestätigen.

Seit Jahrzehnten wirft eine Familie von Kristallen viele Fragen auf: So genannte Cuprate können bei ungewöhnlich hohen Temperaturen Strom widerstandsfrei leiten. Im September 2022 gelang es Physikerinnen und Physikern erstmals, die Supraleitung in einem dieser Stoffe auf atomarer Ebene zu beobachten – und damit die Ursache des rätselhaften Phänomens zu enthüllen. Die Elektronen scheinen demnach durch ihre »Sprunghaftigkeit« in einen reibungslosen Fluss zu geraten, ganz im Einklang mit der so genannten Superaustausch-Theorie, die fast so alt ist wie das Geheimnis selbst. »Die Übereinstimmung von Experiment und Theorie ist erstaunlich«, so der Physiker André-Marie Tremblay von der Université de Sherbrooke in Kanada.

Nun hoffen Fachleute, einem der wichtigsten Ziele der Festkörperphysik näher zu kommen: den zu Grunde liegenden Mechanismus der Supraleitung zu verstärken, um Materialien zu entwickeln, die Strom bei noch höheren Temperaturen widerstandsfrei leiten können. Das Ziel lautet, dies bei Raumtemperatur zu erreichen. »Falls die Superaustausch-Theorie korrekt ist«, so der Physiker J.C. Séamus Davis, der die neuen Experimente an der University of Oxford geleitet hat, »sollte es möglich sein, synthetische Materialien zu entwickeln, die ihre Supraleitfähigkeit bei hohen Temperaturen behalten.«

Die Supraleitung wurde 1911 erstmals beobachtet – und ließ die Fachwelt seither nicht mehr los. Der niederländische Wissenschaftler Heike Kamerlingh Onnes (1853–1926) und seine Mitarbeiter hatten damals

einen Quecksilberdraht auf etwa vier Kelvin (vier Grad Celsius über dem absoluten Nullpunkt) abgekühlt und mit Erstaunen festgestellt, dass der elektrische Widerstand plötzlich verschwand. Die Elektronen strömten durch den Draht, ohne Wärme zu erzeugen.

Es folgten zahlreiche weitere Versuche, bis die Physiker John Bardeen, Leon Cooper und John Robert Schrieffer 1957 ihre mit dem Nobelpreis ausgezeichnete Theorie der Supraleitung vorstellten. Die inzwischen nach ihnen benannte BCS-Theorie besagt, dass Schwingungen im Atomgitter eines Kristalls die darin befindlichen Elektronen zu Paaren zusammenkleben.

Wenn ein Elektron in einem Metall umherfliegt, zieht es die positiv geladenen Kerne an. Diese bewegen sich infolgedessen darauf zu und schirmen einen Teil der negativen Ladung des Teilchens ab. Es entsteht ein positiver Ladungsüberschuss, der andere Elektronen anzieht. Die so erzeugte Anziehungskraft zwischen den Elektronen kann deren elektrische Abstoßung überwinden, wodurch »Cooper-Paare« entstehen.

Durch diesen Zusammenschluss sorgt eine quantenphysikalische Eigenheit für einen widerstandsfreien Stromfluss. Denn normalerweise können sich identische Elektronen nicht überlappen. Sie müssen entweder unterschiedliche Energien besitzen, verschieden ausgerichtete Spins (eine Art Eigendrehimpuls) haben oder sich an unterschiedlichen Orten befinden. Aber Cooper-Paare verhalten sich wie Lichtteilchen, von denen beliebig viele auf einen Stecknadelkopf pas-

sen. Damit verschmelzen die Cooper-Paare zu einem einzigen quantenmechanischen Zustand: einer Supraflüssigkeit, die Atome oder andere Hindernisse, an denen sie entlangfließt, nicht mehr wahrnimmt.

Die BCS-Theorie erklärt, warum einige Metalle wie Quecksilber supraleitend sind, wenn man sie bis fast auf den absoluten Nullpunkt abkühlt. Sobald die Temperatur allerdings um wenige Grad steigt, geht die besondere Eigenschaft verloren. Denn die atomaren Schwingungen, welche die Elektronen aneinanderbinden, sind äußerst sensibel: Die Hitze schüttelt die Atome eines Stoffs, wodurch die geordneten Vibrationen des Gitters verschwinden. So weit stimmen Theorie und Experimente gut überein.

Das größte Rätsel der Festkörperphysik

Das änderte sich allerdings 1986, als die IBM-Forscher Georg Bednorz und Alex Müller Cuprate untersuchten. Dabei handelt es sich um Kristalle aus Kupfer- und Sauerstoffschichten, die zwischen Schichten anderer Elemente eingebettet sind. Nachdem die beiden Physiker eine Probe beobachtet hatten, die bei 30 Kelvin supraleitend war, fanden sie bald weitere Cuprate, die sogar bei 130 Kelvin Strom widerstandsfrei leiten können.

Selbst wenn diese Temperaturen aus Alltagssicht noch immer niedrig sind, weckten die Entdeckungen die Hoffnung, einen Stoff zu entwickeln, der auch bei Raumtemperatur supraleitend ist. Das stieß umfassende Bemühungen an, die Ursache für derartiges Verhalten zu finden: Was



CLAUDOUX / GETTY IMAGES / ISTOCK

LEVITATION Weil Supraleiter äußere Magnetfelder verdrängen, schweben Magnete über ihnen.

klebt die Elektronen in Cupraten so fest zusammen, dass sie den hohen Temperaturen standhalten?

Der US-amerikanische Nobelpreisträger Philip Anderson (1923–2020) stellte nur wenige Monate nach Müllers und Bednorz' Entdeckung eine Theorie dazu auf. Der Klebstoff könnte ein bereits bekanntes Quantenphänomen sein: der Superaustausch. Dabei handelt es sich um eine Kraft, die aus der Fähigkeit der Elektronen entsteht, zwischen verschiedenen Atomen im Kristallgitter hin und her zu hüpfen. Wenn es zahlreiche Optionen gibt, wo sich ein Teilchen befinden kann (viele Orte, zu denen es springen könnte), dann verschwimmt dessen exakte Position immer stärker. Aus der heisenbergschen Unschärferelation folgt somit, dass der Impuls des Partikels scharf definiert ist. Damit sind dem Impuls nach oben Grenzen gesetzt und ebenso der Energie des Elektrons. Je sprunghafter ein Teilchen, desto energieärmer und damit bevorzugter ist also sein Zustand.

Elektronen suchen folglich Situationen, in denen sie hüpfen können. Deshalb richten sie ihren Spin in Kristallen vorzugsweise entgegengesetzt zu dem ihrer Nachbarn aus. Denn nur dann erlauben es die quantenmechanischen Regeln, dass das Teilchen zu seinem benachbarten Atom hüpfen (identische Elektronen dürfen sich nicht überlappen). Wegen des Superaustauschs trifft man in einigen Materialien daher ein regelmäßiges Auf-ab-auf-ab-Muster der

Elektronenspins an. Außerdem werden die Elektronen gezwungen, einen festen Abstand zu halten, der nicht allzu groß ist. Sie werden quasi auf Distanz aneinandergebunden. Das wirkt wie eine Anziehungskraft, von der Anderson glaubte, dass sie ausreiche, um starke Cooper-Paare zu bilden.

Allerdings ließen sich solche Theorien bislang nur schwer testen, da die messbaren Materialeigenschaften wie Reflexionsvermögen oder Widerstand lediglich das gemeinsame Verhalten von Abermilliarden von Elektronen beschreiben – und nicht das von einzelnen Cooper-Paaren. Doch der Physiker Davis, der an Laboren in Oxford, an der Cornell University, am University College Cork und am Max-Planck-Institut für chemische Physik fester Stoffe in Dresden mitwirkt, hat nun eine Methode entwickelt, um Cuprate auf atomarer Ebene zu untersuchen.

In früheren Experimenten haben Fachleute die Stärke der Supraleitung eines Materials bestimmt, indem sie es abkühlten. Die kritische Temperatur, bei der das Phänomen beginnt, gilt als Indikator für die Stärke des Klebstoffs zwischen den Elektronenpaaren. Höhere Übergangstemperaturen wiesen auf besseren Kleber hin. In den letzten zehn Jahren haben die Forscherinnen und Forscher um Davis jedoch eine Technik entworfen, um die Paarung einzelner Teilchen aufzulösen.

Dafür nutzten sie die Rastertunnelmikroskopie, bei der man mit einer extrem dünnen Nadel eine Oberfläche abfährt und den Strom von Elektronen bestimmt, der zwischen Nadel und Oberfläche fließt. Indem

die Forscher die Metallspitze der Nadel gegen eine supraleitende austauschten und sie über ein Cuprat zogen, konnten sie den Strom von Elektronenpaaren statt von einzelnen Teilchen messen. Auf diese Weise gelang es den Fachleuten 2016, die Dichte der Cooper-Paare um jedes Atom herum abzubilden – wodurch sie ein direktes Maß für die Supraleitfähigkeit erhielten.

Im selben Jahr konnte eine andere Arbeitsgruppe an der Tsinghua-Universität in Peking zeigen, dass die kritische Temperatur eines bestimmten Cuprats umso höher ausfällt, je leichter die Elektronen zwischen den Kupfer- und Sauerstoffatomen hüpfen können. Dieses Verhalten stimmt mit Andersons Superaustausch-Theorie überein.

Sprunghafte Elektronen als Erklärung

Davis und seine Kollegen versuchten daraufhin, die beiden Ansätze miteinander zu verbinden, indem sie das chinesische Experiment mit ihrer Rastertunnelmethode umsetzten. Dafür mussten sie einen geeigneten Cuprat-Kristall finden. Bei einer virtuellen Besprechung im Jahr 2020 erkannten die Forscher, dass Bismut-Strontium-Calcium-Kupferoxid (BSCCO) eine Eigenschaft besitzt, die das gewünschte Experiment ermöglicht: Die Schichten aus Kupfer- und Sauerstoffatomen werden von den umgebenden Atomschichten in ein wellenförmiges Muster gepresst. Dadurch variieren die Abstände zwischen den Atomen, was wiederum die zum Hüpfen benötigte Elektronenenergie beeinflusst. Damit hatten die Experimentatoren genau das, was sie brauchten: Bereiche unterschiedlicher »Sprunghaftigkeit« in einer einzelnen Probe.

Um die Sprungenergien zu bestimmen, verwendeten sie zunächst ein gewöhnliches Rastertunnelmikroskop. Anschließend setzten sie eine Cuprat-Spitze ein, um die Dichte der Cooper-Paare um jedes Atom herum zu messen. Und tatsächlich: Die beiden Messungen passten zusammen. An den Stellen, wo die Elektro-

nen nur schwer springen können, fiel die Supraleitung schwach aus. Wo das Hüpfen hingegen leicht war, zeigte sich die Supraleitung stark. Die Beziehung zwischen der Sprungenergie und der Cooper-Paar-Dichte stimmte genau mit einer computer-gestützten Vorhersage des Physikers André-Marie Tremblay und seinen Kollegen aus dem Jahr 2021 überein, die auf Andersons Theorie beruht. Diese Ergebnisse legen nahe, dass der Superaustausch die Cooper-Paare in Cupraten zusammenhält und damit die Hochtemperatursupraleitung ermöglicht.

Allerdings warnen einige Fachleute, darunter der Physiker Ali Yazdani von der Princeton University davor, voreilige Schlüsse zu ziehen. Es könnte sein, dass die Stärke des Klebers und die Sprungenergie aus einem anderen Grund zusammenhängen – man darf Korrelation nicht mit Kausalität gleichsetzen. Einen echten Beweis würde Yazdani darin sehen, wenn es tatsächlich gelänge, mit

Hilfe der Superaustausch-Theorie bessere Supraleiter zu entwickeln.

Viele Forscher haben schon darüber nachgedacht, ob man den Effekt des Superaustauschs in Materialien verstärken kann, zum Beispiel indem man das Kupfer- und Sauerstoffgitter zusammendrückt oder mit anderen Elementen experimentiert. »Es gibt bereits einige Vorhersagen«, so Tremblay.

Aber die atomaren Baupläne lassen sich weder schnell noch einfach umsetzen. Außerdem ist nicht garantiert, dass maßgeschneiderte Cuprate viel höhere kritische Temperaturen erreichen als die bekannten Proben. Die Stärke des Superaustauschs könnte eine Obergrenze haben, genau wie bei den atomaren Gitterschwingungen. Deshalb ist die Suche nach anderen Arten von Klebstoffen noch lange nicht beendet. ◀

Charlie Wood ist Physiker und Wissenschaftsjournalist in New York.

QUELLEN

Davis, J. C. S. et al.: On the electron pairing mechanism of copper-oxide high temperature superconductivity. PNAS 119, 2022

Davis, J. C. S. et al.: Detection of a Cooper-pair density wave in BiSrCaCu. Nature 532, 2016

Tremblay, A.-M. et al.: Oxygen hole content, charge-transfer gap, covalency, and cuprate superconductivity. PNAS 118, 2021

Wang, Y. et al.: Relationship between the parent charge transfer gap and maximum transition temperature in cuprates. Science Bulletin 61, 2016



Von »Spektrum« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »High-Temperature Superconductivity Understood at Last« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

Spektrum PLUS+

IHRE VORTEILE EINES SPEKTRUM-ABONNEMENTS



MEET AND GREET mit **Chefredakteur Daniel Lingenhöhl**

Abonnentinnen und Abonnenten können am digitalen Redaktionsbesuch von **Spektrum** der Wissenschaft am 20. März 2022 teilnehmen.

Anmeldung und weitere Vorteile:

Spektrum.de/plus

EVOLUTION

Der Beginn der Warmblütigkeit

Fossilien des Innenohrs verraten einen entscheidenden Schritt in der Evolution der Wirbeltiere: Wann begannen die Säugetiere, ihre Körpertemperatur zu regulieren?

Im Gegensatz zu anderen Wirbeltieren vermögen Säugetiere, ihre Körpertemperatur konstant zu halten. Diese Regulationsfähigkeit, die als Endo- oder Homoiothermie bezeichnet wird, gilt als ein wichtiger Schritt in der Evolution der Landwirbeltiere. Wann kam es dazu?

Wie Fachleute vermuten, entwickelte sich die Endothermie parallel zu einer gesteigerten aeroben Kapazität, die wiederum eine höhere körperliche Aktivität ermöglichte. Mit anderen Worten: Im Gegensatz zu wechselwarmen Organismen können gleichwarme Tiere für ihre Energiegewinnung mehr Sauerstoff nutzen und sich daher schneller bewegen.

Wer aber rasch unterwegs ist, muss die Lage seines Körpers im Raum gut kontrollieren und dabei die Umwelt im Auge behalten. Hier kommt das Innenohr ins Spiel: Es enthält Bewegungssensoren, die ähnlich wie die Sensorkomponenten in einem Smartphone die Kopfbewegungen registrieren, so dass der Körper sein Gleichgewicht halten kann. Freilich funktionieren sie ganz anders als ihre digitalen Pendanten.

Anatomische Grundlage für das Wahrnehmen von Drehbeschleunigungen bilden die Bogengänge des Innenohrs, die mit einer Flüssigkeit namens Endolymphe gefüllt sind (siehe »Innenohr und Körpertemperatur«, a). Sobald sich die Bogengänge mit dem Kopf drehen, bleibt die Endolymphe auf Grund ihrer Trägheit mehr oder weniger im Raum stehen – sie fließt also relativ zum Kopf in die entgegengesetzte Richtung. Dadurch werden die Zilien der Haarsinneszellen in der so genannten Cupula abgelenkt, die daraufhin neuronale Signale zu den entsprechenden Hirnregionen senden.

Das Ganze funktioniert nur, wenn die Ausmaße der Bogengänge und die Viskosität der Endolymphe zueinander passen. Mit steigender Temperatur wird die Endolymphe weniger zähflüssig, ihre Viskosität nimmt also ab. Damit das Gleichgewichtsorgan im Innenohr noch funktionsgerecht arbeiten kann, müssen Tiere mit einer höheren Körpertemperatur die geringere Viskosität anatomisch ausgleichen. Das lässt sich erreichen, indem sich der Durchmesser der Bogengänge reduziert.

Index für Körperwärme

Diese Überlegungen inspirierten Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen um Ricardo Araújo von der Universität Lissabon in Portugal zu einer eindrucksvollen Studie. Sie kombinierten paläontologische Befunde mit biomechanischen Daten, um anhand fossiler Überreste von Innenohren herauszufinden, wann die ersten gleichwarmen Tiere auftraten. Hierzu kreierten die Forscher einen so genannten Thermomotilitätsindex (TMI), in dem sich die Beziehung zwischen den Abmessungen der Bogengänge, ihren Funktionsgrenzen sowie der Körperwärme niederschlägt (siehe »Innenohr und Körpertemperatur«, b).

Um die Vorhersagekraft ihres TMI zu testen, bestimmten die Wissenschaftler ihn bei mehr als 200 heute lebenden gleich- und wechselwarmen Arten. Dazu betrachteten sie die Größe der Bogengänge sowie die Körpermasse und verknüpften diese Werte mit den bekannten Körpertemperaturen der Tiere.

Aus der so ermittelten Beziehung versuchte die Arbeitsgruppe die Körpertemperatur von 56 ausgestorbenen Arten abzuschätzen. Dabei

ergab sich, dass der TMI vor etwa 230 Millionen Jahren mehr oder weniger schlagartig anstieg – zu dieser Zeit sollten demnach die Tiere die Schwelle zur Endothermie überschritten haben. Der Zeitpunkt fällt geologisch ins Obertrias, als sich das Klima mit globaler Erwärmung und erhöhter Feuchtigkeit großflächig veränderte (siehe »Spektrum« Mai 2020, S. 46). Die ersten Wirbeltiere, die ihre Körpertemperatur regulieren konnten, gehörten wahrscheinlich zu den Mammaliamorpha – nagetierartige Wesen, die wohl die Vorfahren aller heutigen Säugetiere waren und etwa zur gleichen Zeit wie die ersten Dinosaurier erschienen.

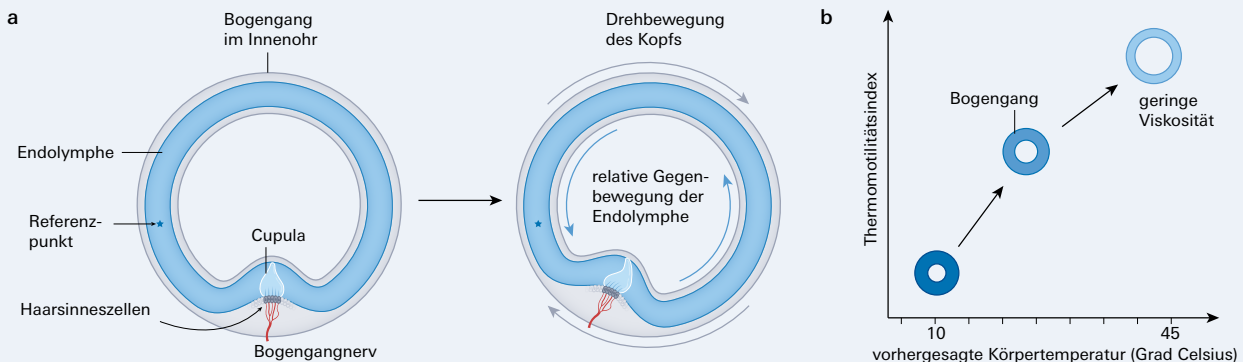
Die Studie von Araújo und seinen Kollegen liefert noch weitere Erkenntnisse: Bei heutigen Arten steigt der TMI mit der Körperwärme stärker an, als dies allein durch temperaturbedingte Viskositätsänderungen zu erwarten wäre. Die Forscher deuten das als eine Verbesserung des Gleichgewichtssinns, die im Lauf der Evolution der Endothermie auftrat. Eine höhere Körpertemperatur ermöglichte verstärkte körperliche Aktivitäten, die wiederum Sinnesorgane erforderten, die mit schnelleren Bewegungen zurechtkamen. Oder kurz gesagt: Man kann nur so schnell laufen, wie das Innenohr die Bewegung erfassen kann.

Die Schlussfolgerung, dass die ersten gleichwarmen Säugetiere im Obertrias auftauchten, passt zu anderen Studien, wenngleich der genaue Zeitpunkt dieses Evolutionschritts umstritten ist. So vermuten manche Fachleute auf Grund paläontologischer Befunde etwa zur Entwicklung eines Haarkleids, zu Anzeichen von Nachtaktivität oder zu bestimmten Skeletteigenschaften,

Innenohr und Körpertemperatur

Im Innenohr der Säugetiere liegen drei senkrecht zueinander stehende Bogengänge, die als Winkelbeschleunigungssensoren des Gleichgewichtsorgans fungieren (a). Sobald sich der Kopf dreht, verharrt die sich im Innern des Bogengangs befindliche Endolymphe auf Grund ihrer Trägheit mehr oder weniger an Ort und Stelle (siehe Referenzpunkt), wodurch sie sich relativ zur Kopfdrehung in die entgegengesetzte Richtung bewegt. Dadurch wird die Cupula mit ihren Haarsinneszellen zur Seite gedrückt; die dabei ausgelöste elektrische Erregung gelangt als Nervensignal ins Gehirn.

Mit steigender Körpertemperatur einer Spezies nimmt die Viskosität der Endolymphe ab (hellere Farbe in b). Damit der Gleichgewichtssinn weiterhin arbeiten kann, müssen sich die Ausmaße der Bogengänge an diese veränderte Zähflüssigkeit anpassen, etwa indem die flüssigkeitsgefüllten Gangsysteme dünner werden. Das Team um Ricardo Araújo definierte einen Thermomotilitätsindex, mit dem sich die Körpertemperatur anhand von Größe und Form des Bogengangs in Fossilien vorhersagen lässt. Damit schätzten die Forscher ab, wann die Vorfahren der Säugetiere begannen, ihre Körpertemperatur zu regulieren.



GLASAUER, S., STRAKA, H.: EVOLUTION OF THERMOREGULATION AS TOLD BY EAR. NATURE 607, 2022. FIG. 1: BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

dass sich die Endothermie der Säugetiere ungefähr 20 Millionen Jahre früher am Übergang zwischen Perm und Trias entwickelte.

Die Arbeit von Araújo stößt jedoch an Grenzen. Fossilien verraten lediglich die knöchernen Abmessungen der Gehörgänge. Wir wissen weder, wie das membranöse Innenohrlabyrinth genau aussah, noch kennen wir die molekulare Zusammensetzung der Endolymphe, die wiederum deren Viskosität bestimmt. Die Forscher gingen davon aus, dass die Innenohrflüssigkeit während der Evolution der Säugetiere unverändert blieb. Bei einer anderen Gruppe gleichwarmer Wirbeltiere, den Vögeln, besitzt sie allerdings eine deutlich höhere Viskosität. Das Team um Araújo vermutet daher, dass Vögel und vielleicht auch ihre Dinosaurier-Vorfahren eine höhere Körpertemperatur zum Teil durch

eine veränderte biochemische Zusammensetzung ihrer Endolymphe kompensierten.

Ein besonderes Manko der Studie liegt in der Tatsache, dass die Arbeitsgruppe lediglich drei Vertreter der Probainognathia berücksichtigte – Landwirbeltiere, die nicht zu den Mammaliaforma gehörten, aber vermutlich unsere nächsten wechselwarmen Verwandten waren. Und trotz der sorgfältig durchgeführten mathematischen und statistischen Berechnungen kann der auf Basis des veränderten TMI geschätzte Beginn der Endothermie um einige zehn Millionen Jahre danebenliegen. Angesichts der großen Variationen zwischen TMI und Körpertemperatur bei heutigen Arten könnten die Daten zu den wenigen untersuchten ausgestorbenen Spezies letztlich auch Ausreißer darstellen. Dennoch wirft

diese Studie durch die Verknüpfung sensorischer Anforderungen mit der Mobilität früher Säugetiere einen erfrischend neuen Blick auf den Beginn der Endothermie. ◀

Stefan Glasauer ist Professor am Institut für Medizintechnologie der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg. **Hans Straka** war Professor im Bereich Neurobiologie der Ludwig-Maximilians-Universität München.

QUELLE

Araújo, R. et al.: Inner ear biomechanics reveals a Late Triassic origin for mammalian endothermy. *Nature* 607, 2022

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 607, S. 661–662, 2022

ATOMUHREN

Gleichtakt über Rekorddistanz

Ein chinesisches Forschungsteam hat zwei optische Atomuhren extrem präzise und kabellos miteinander verbunden. Dazu schickte es Laserlicht 113 Kilometer weit durch die Atmosphäre.

▶ Optische Atomuhren sind die leistungsfähigsten Zeitmesser der Welt und etwa 100-mal präziser als herkömmliche Atomuhren. Auf Letzteren basieren im Moment die koordinierte Weltzeit und die Definition einer Sekunde. Diese soll etwa von 2030 an mit Hilfe optischer Uhren auf eine neue technologische Grundlage gestellt werden. Das dürfte ein entsprechend besseres Fundament für hochgenaue Zeitmessungen legen und für alles, was davon abhängt: von Finanz- und Kommunikationssystemen über Satellitennavigation bis zu diversen wissenschaftlichen Experimenten.

Auf dem Weg dorthin braucht es jedoch ein zuverlässiges Verfahren, mit dem sich die Takte von optischen Uhren abgleichen lassen, selbst wenn sie in Laboren auf verschiedenen Kontinenten stehen. Nur dann gibt es eine gemeinsame Referenz für die Daten, unabhängig davon, wo sie erhoben wurden. In der Praxis wird das erfordern, die Signale mittels Satelliten hin und her zu schicken. Auf dem Weg in den Weltraum und zurück müssen sie aber durch die Atmosphäre. Dort stört die Luft die Signale.

Dem Problem hat sich der Quantenphysiker Jian-Wei Pan von der Chinesischen Universität für Wissenschaft und Technik gewidmet. Seinem Team ist es gelungen, Laserimpulse zwischen 113 Kilometer voneinander entfernten Uhren zu übermitteln. Das schlägt den bisherigen Rekord von 16 Kilometern deutlich. David Gozzard, Experimentalphysiker an der University of Western Australia in Perth, hält das im Oktober 2022 veröffentlichte Ergebnis für herausragend. Eine so gute Synchronisie-

rung über eine derart große Entfernung sei ein »bedeutender Fortschritt dabei, das gleiche zwischen einem Satelliten und dem Boden zu erreichen«.

Die zeitliche Koordinierung hochpräziser Uhren an schwer zugänglichen Orten könnte auch in anderen Bereichen der Forschung von Vorteil sein, meint Tetsuya Ido, Direktor des Space-Time Standards Laboratory

Sogar subtile Veränderungen der Gravitation wären messbar

am Radio Research Institute in Tokio. Zum Beispiel lässt sich die Zeitmessung mit Effekten der allgemeinen Relativitätstheorie kombinieren, laut der Uhren an Orten mit stärkerer Schwerkraft langsamer ticken. Ido hofft, synchronisierte optische Uhren könnten auf die Weise sogar subtile Veränderungen bei den Gravitationsfeldern aufzeigen, die durch die Verschiebung tektonischer Platten verursacht werden.

Seit 1967 wird die Sekunde mittels Zäsium-133-Atomen definiert. Beim Wechsel zwischen bestimmten Energieniveaus absorbieren und emittieren die Atome Mikrowellen einer charakteristischen Frequenz. Eine Sekunde ist als exakt das 9192 631 770-Fache der Periode dieser Strahlung festgelegt.

Moderne optische Uhren können die Zeit in noch feinere Bruchteile zerlegen, weil sie den höherfrequenten Takt von speziellen Übergängen

in Elementen wie Strontium und Ytterbium messen.

Will man sich international einigen, zu welchem Zeitpunkt ein Ereignis stattgefunden hat, braucht man mehr als eine einzige auf die Weise bestimmte lokale Zeit. Man muss vielmehr die Ergebnisse von hunderten entsprechenden Messgeräten auf der ganzen Welt miteinander abgleichen. Bei Zäsiumuhren ist das relativ unkompliziert, weil sich Mikrowellen per Funk übertragen lassen. Doch bei den kürzeren Wellenlängen optischer Atomuhren geht das nicht so leicht, denn die Moleküle in der Luft absorbieren das Licht. Das schwächt die Signalstärke schnell drastisch. Außerdem können atmosphärische Turbulenzen einen Laserstrahl vom Ziel ablenken.

Deswegen erforderte der Abgleich optischer Uhren bisher eine Verbindung über Glasfaserkabel – oder gar den Transport der sperrigen, komplexen Zeitmesser selbst. Das erschwerte den Weg zu einem globalen Netzwerk, wie es für die Neudefinition der Sekunde erforderlich wäre.

Trickreiche Signale

Der Erfolg des chinesischen Teams beruht auf der Kombination mehrerer Einzelentwicklungen. Das Signal entstand mittels so genannter Frequenzkämme, die ein extrem stabiles und präzises Laserlicht ermöglichen. Dessen Impulse waren dank Hochleistungsverstärkern intensiv genug, dass trotz der unvermeidlichen Verluste während des Durchlaufens der Luft noch genügend bei den Empfängern ankam. Letztere waren speziell für die Aufgabe optimierte Teleskope und konnten Signale mit geringer Leistung auffangen sowie sich der Richtung des ankommenden Lasers anpassen.

Die Arbeitsgruppe übertrug das Ticken mit zwei Wellenlängen des sichtbaren Lichts und setzte parallel eine Glasfaserverbindung ein. Beim Vergleich der Signale zeigte sich: Sie blieben im Strahl über Stunden hinweg so stabil, dass rechnerisch nur etwa alle 80 Milliarden Jahre eine Sekunde verloren geht oder hinzukommt. Diese extreme Genauigkeit ist typisch für optische Uhren; die leistungsfähigsten von ihnen sind sogar noch besser.

Um an die Spitzenreiter heranzureichen, müsse die Methode weiter optimiert werden, merkt Gozzard an. Ido betont eine weitere Einschränkung des Experiments, das in einer abgelegenen Region mit optimalen atmosphärischen Bedingungen durchgeführt wurde: »Die Luftfeuchtigkeit ist dort recht niedrig, außerdem dürften die Turbulenzen in städtischen Regionen ausgeprägter sein.« Künftige Studien werden prüfen müssen, wie gut sich das Konzept auf andere Orte übertragen lässt.

Nach Einschätzung der britischen Physikerin Helen Margolis vom National Physical Laboratory in Teddington lässt der Versuch allerdings bereits Rückschlüsse darüber zu, wie gut das Aussenden solcher Signale in den Weltraum klappt dürfte. So seien die zu erwartenden Turbulenzen über 113 Kilometer entlang des Erdbodens in Summe vergleichbar mit denen auf dem Weg von einer Bodenstation zu einem Satelliten. Margolis koordiniert ein europäisches Projekt mit dem Ziel, auf dem Weg zur Neudefinition der Sekunde optische Uhren zuverlässiger zu machen und ihren Betrieb und Abgleich zu automatisieren.

Gozzard zufolge kommt bei der satellitengestützten Zeitkoordination die Hürde hinzu, dass sich durch die hohen Geschwindigkeiten im Erdorbit die Frequenzen der Signale relativ zu irdischen Messstationen verschieben. An dem Problem arbeitet Pan. Er betont die Chancen, die solch präzise Uhren im Weltraum überdies für die Grundlagenforschung böten: »Mit

ihnen gäbe es neue Sonden etwa für Gravitationswellen und die Suche nach Dunkler Materie.« Pans Team hat zuvor Technologien für Quantenkommunikation mittels Satelliten entwickelt und erprobt. Die Erfahrungen damit sollen nun eine Basis für Übertragungen zwischen optischen Uhren in der geostationären Umlaufbahn und am Boden schaffen. ◀

Elizabeth Gibney ist Physikjournalistin bei »Nature«.

QUELLEN

Shen, Q. et al.: Experimental simulation of time and frequency transfer via an optical satellite-ground link at 10^{-18} instability. *Optica* 8, 2021

Shen, Q. et al.: Free-space dissemination of time and frequency with 10^{-19} instability over 113 km. *Nature* 610, 2022

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 610, S. 616–617, 2022

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

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

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Assistenz Geschäftsleitung: Stefanie Lacher

Herstellung: Natalie Schäfer

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

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

Übersetzungen: An diesem Heft wirkte mit: Dr. Markus Fischer

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

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

Bezugspreise: Einzelheft € 9,30 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 98,40; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 75,-; 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.

Ein Teil der Auflage beinhaltet eine Beilage von Plan International Deutschland e. V.

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

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

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

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

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

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



Überlebenskünstler

Bakterien sind gemeinsam stark. Sogar zu strategischem Verhalten sind sie fähig.

» [spektrum.de/artikel/2085723](https://www.spektrum.de/artikel/2085723)

Darf ich Ihnen, bevor wir zu den Bakterien kommen, zunächst ein erfolgreiches höheres Lebewesen vorstellen? Stefany Moreno-Gómez studierte an der Universidad de los Andes in Bogota (Kolumbien) und überquerte dann ostwärts den Atlantik, um an der Universität Groningen und der ETH Zürich ihr Studium der Evolutionsbiologie abzuschließen. Danach sprang sie westwärts nach Nordamerika an das Massachusetts Institute of Technology, wo sie die Evolutionsdynamik von Darmbakterien erforscht. Nun wurde sie beim Essay-Wettbewerb der Zeitschrift »Science« mit dem ersten Preis in der Sparte Ökologie und Umwelt ausgezeichnet.

Damit wird nicht nur eine herausragende Arbeit belohnt, sondern auch die Eleganz der Darstellung. Das gestattet einem bakteriologischen Laien wie mir, von den präsentierten Resultaten fasziniert zu sein (*Science* 378, S. 845-A–845-B, 2022).

Zur Überlebenskunst von Bakterien gehört, dass sie auf unvorteilhafte Umweltbedingungen mit einer Art Scheintod reagieren. Im Sporenstadium stoppt der Stoffwechsel auf fast unbegrenzte Zeit: Noch nach Tausenden von Jahren lassen sich derart schlummernde Bakterien zu neuem Leben erwecken.

Aber wie merkt so ein winziges Wesen rechtzeitig, dass ihm lebensbedrohende Unbill droht? Die dafür relevanten Umweltinformationen sind oft schwach und uneindeutig. Moreno-Gómez fand heraus, dass sich die Bakterien durch den Austausch von Signalmolekülen quasi zusammenschalten, um gemeinsam gegen eine plötzlich feindliche Welt gewappnet zu sein.

Dabei schwankt die Produktion der Signalmoleküle im Takt der ökologischen Bedrohung. Das wies die junge Forscherin nach, indem sie Kulturen von *Streptococcus pneumoniae* durch Zugabe von periodisch wechselnden Antibiotikamengen stresste. Im Computermodell zeigte sich, dass die Kulturen durch den passend hoch- und runterregulierten Signalaustausch einen Überlebensvorteil gewinnen, den ein einzelnes Bakterium nicht hätte. Die vermeintlich primitiven Organismen profitieren von kollektivem Verhalten – sie zeigen Schwarmintelligenz.

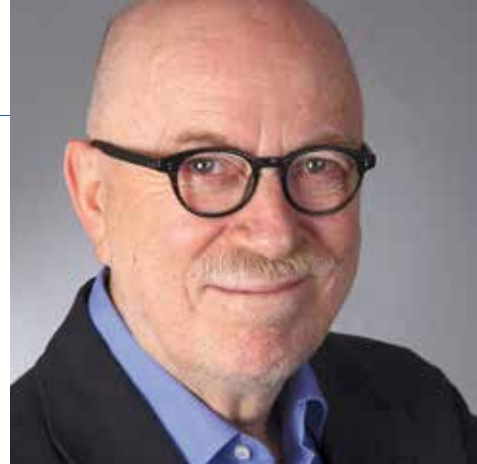
Damit nicht genug. In einem zweiten Experiment untersuchte die Preisträgerin, wie Bakterien auf ein unregelmäßiges Nahrungsangebot reagieren. Es wäre zu erwarten, dass hungrige Mikroorganismen jede Chance nutzen, um sich den Bauch vollzuschlagen. Sie können ja nicht an später denken. Dadurch werden zwar sofort Wachstum und Zellteilung angeregt – was aber unter instabilen Umweltbedingungen die ganze Sippschaft wiederum besonders verwundbar macht.

Die Forscherin beobachtete unter dem Mikroskop hunderte ausgehungerte Exemplare des Darmbakteriums *Escherichia coli* und registrierte, wie schnell sie nach einer Nahrungsvergabe wuchsen. Offenbar nahmen keineswegs alle direkt und gleichermaßen zu. Manche reagierten unmittelbar, andere warteten 20 Generationen und länger, bis sie anfangen, sich zu reproduzieren.

Diese Varianz scheint auf den ersten Blick gar nicht optimal für den Fortpflanzungserfolg zu sein. Müsste nicht gelten: je schneller, desto besser? Oder hat die zeitliche Streuung gar Vorteile?

Um das zu testen, stresste Moreno-Gómez die Bakterien mit plötzlich und kurz hinzugefügten Antibiotika. Und tatsächlich: Die entwicklungsverzögerten, noch nicht vergrößerten Individuen hatten nun einen Überlebensvorteil, während die bereits gewachsenen Exemplare von den Antibiotika hinweggerafft wurden. Auf diese Weise überleben unter Umweltstress vorzugsweise gemischte Populationen, die das Nahrungsangebot unterschiedlich rasch verzehren. Die Bakterien verhalten sich strategisch!

So sehr das schöne Resultat die ausgezeichnete Forscherin ehrt und den Respekt vor scheinbar simplen Organismen erhöht, birgt es auch eine Warnung: Bakterielle Krankheitserreger haben viele Tricks auf Lager, um sich gegen Antibiotika zu wappnen.



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



Aus der Welt. Aus der Weltstadt.

Mit dem neuen Tagesspiegel lesen Sie zwei Zeitungen in einer: 40 Seiten aus Deutschland und der Welt. 40 Seiten aus Berlin. Sieben Tage die Woche.

Die ausgebaute Tagesspiegel-Redaktion und über 1.000 Experten aus unserem globalen Netzwerk bieten Ihnen exklusive Informationen und Analysen.

Für die wichtigsten Zukunftsthemen wie Klima, Digitalisierung und Mobilität haben wir Spezialisten-Teams aufgebaut. Und über die Hauptstadtregion informieren wir Sie aus unserer preisgekrönten Berlin-Redaktion.

Testen Sie jetzt den neuen Tagesspiegel! Gedruckt, digital oder beides.




Gedruckt, digital oder beides



40 Tage gratis lesen:
tagesspiegel.de/testen

Die Herrschaft des Schleims



ZWEI WELTEN Vor dem Massenaussterben im späten Perm gedieh das Leben in waldreichen Feuchtgebieten (links). Nach der Katastrophe vermehrten sich Bakterien und Algen enorm, was die Binnengewässer in schleimig-giftige Brühen verwandelte (rechts).

VICTOR LESNYK / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2012; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Während des verheerenden Massenaussterbens am Ende des Perms erstickten Bakterien und Algen das übrige Leben in den Gewässern. Möglicherweise steht uns heute Ähnliches bevor.

» spektrum.de/artikel/2085726



Chris Mays (links) arbeitet als Dozent für Paläontologie am University College Cork in Irland. **Vivi Vajda** (Mitte) forscht als Geologin am Schwedischen Museum für Naturgeschichte. **Stephen McLoughlin** ist ebenda Kurator der Pflanzenfossilien-Sammlungen des Erdaltertums und des Erdmittelalters.



VICTOR LESNYK / SCIENTIFIC AMERICAN, JULI 2022,
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

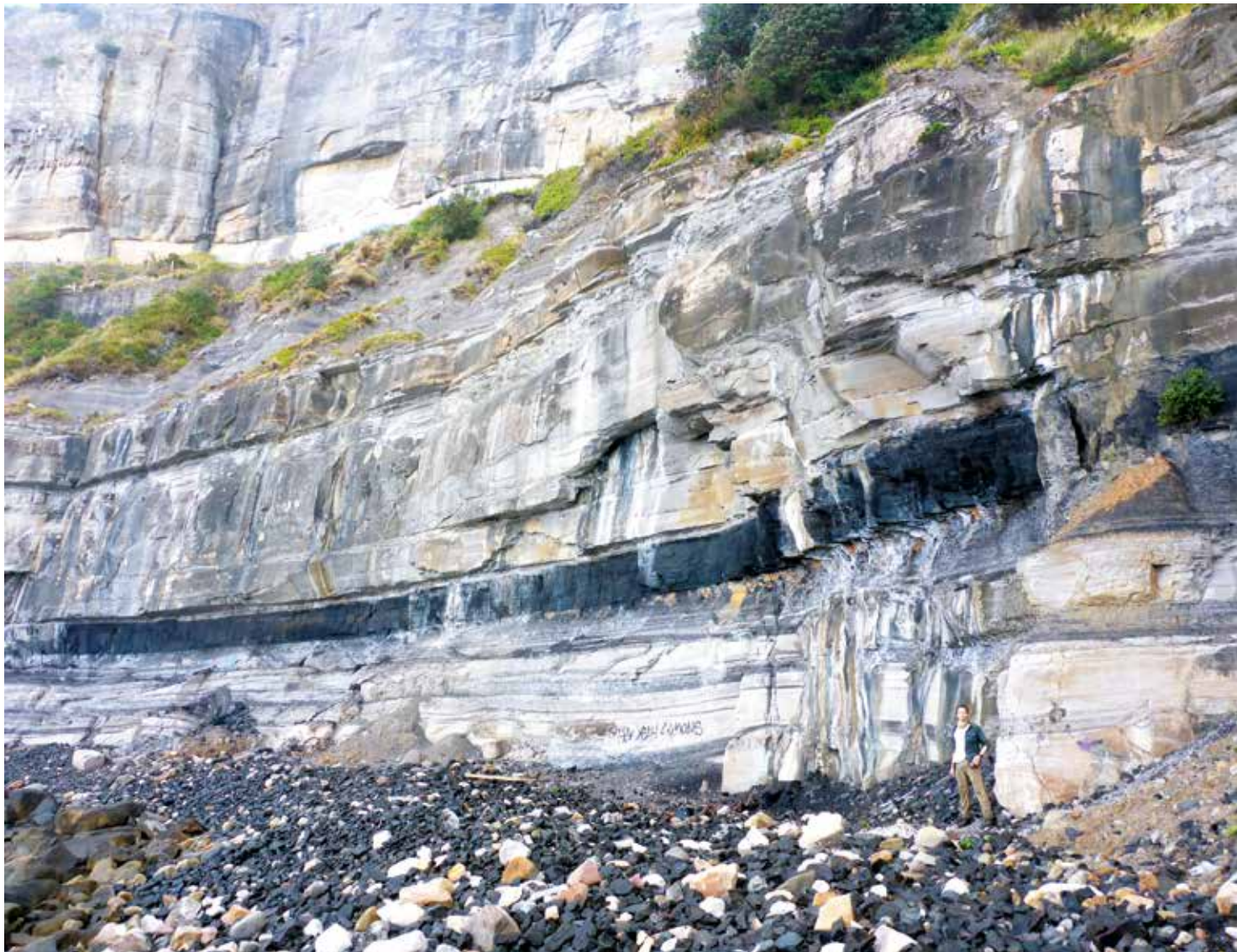
▶ An einem Sommertag im östlichen Australien, etwa eine Autostunde von Sydney entfernt, kletterten wir in aller Frühe am Fuß einer Klippe entlang. Wir suchten nach Gesteinsmaterial, von dem wir uns Hinweise auf eines der dunkelsten Kapitel der Erdgeschichte erhofften. Krisenzeiten gab es auf diesem Planeten einige: Das Leben hier ist mehrmals erschreckend knapp der Auslöschung entgangen. Die Zahl der vernichteten Arten übertraf dabei jene der Überlebenden – zumindest, soweit sich das anhand der Fossilien erkennen lässt. Eine besonders schwere Katastrophe ereignete sich vor 252 Millionen Jahren am Ende des Perms. Damals herrschten die vielleicht widrigsten Bedingungen, denen die Tierwelt je ausgesetzt war. Brände und Dürren verwüsteten das Land; in den Ozeanen breiteten sich heiße, sauerstoffarme Todeszonen aus.

Zahlreiche Tier- und Pflanzenarten überlebten das nicht. Mehr als 70 Prozent der landlebenden und bis zu 80 Prozent der marinen Spezies starben aus, weshalb manche Paläontologen diesen erdgeschichtlichen Abschnitt als »Großes Sterben« bezeichnen.

SPUREN DER VORZEIT Die Kohleablagerungen des späten Perms zeichnen sich als deutlich erkennbare schwarze Schicht im Gestein ab. Auf ihnen ruhen dicke Lagen fossilarmen Sandsteins der frühen Trias.

Spuren jenes Ereignisses zeigen sich in Form von Fossilien auf der ganzen Welt – aber nur selten so deutlich wie an den steinigen Küsten Ostaustraliens. Am Vormittag hatten wir gefunden, wonach wir suchten: eine offen zu Tage liegende Kohleschicht in einer steil aufragenden Felswand. Der Stratigrafie-Experte Christopher Fielding von der University of Connecticut, ein langjähriger Kollege, hatte diese Schicht kurz zuvor als See- oder Flusssediment identifiziert, das während der Endzeit des Perms abgelagert worden war. Wir wollten darin nach fossilen Überresten der Überlebenden des »Großen Sterbens« suchen.

Schon beim ersten Blick auf die Steilwand sahen wir klare Hinweise auf die vorzeitliche Katastrophe. Der untere Teil des Felsens besteht aus Tonstein, und auf ihm ruht die besagte Kohlelage (siehe »Spuren der Vorzeit«). Sie stammt aus dem späten Perm, etwa 259 bis 252 Millionen Jahre vor heute, und ist aus zusammengepresstem Pflanzenmaterial von Sumpfwäldern hervorgegangen, die im Süden des damaligen Superkontinents Gondwana wuchsen. Oberhalb dieser Schicht finden sich Sandsteinlagen aus der nachfolgenden Triaszeit, die auf ein Alter von 252 bis 247 Millionen Jahren datieren. Sie sind völlig frei von Kohle. Eine Beobachtung, die uns bekannt vorkam: Nirgendwo auf der Welt hat man in



Gesteinen der frühen Trias ein Kohleflöz gefunden. Entstanden sind jene Sedimente infolge der allmählichen Ablagerung von Sand und Schlamm am Grund von Gewässern – offenbar ungestört von lebenden Organismen.

Weil sie so gut wie keine ausbeutbaren fossilen Brennstoffe enthalten, wurden die Gesteinsschichten aus der frühen Trias – salopp als »Kohlelücke« bezeichnet – bisher wenig beachtet. Nun jedoch erweisen sie sich als Schlüssel, um eine wichtige Phase der Erdgeschichte zu verstehen. Wir wissen jetzt, dass sie das Symptom einer globalen Krise darstellen. Gegen Ende des Perms brachen nämlich die Ökosysteme flächendeckend zusammen, sowohl an Land als auch im Wasser einschließlich der Süßgewässer. Es ist erwiesen, dass es damals zu einem drastisch ausgeprägten globalen Temperaturanstieg kam. Wie unsere jüngsten Forschungsarbeiten zeigen, ging er mit gewaltigen Bakterien- und Algenblüten einher, die Flüsse und Seen erstickten und in sauerstoffarme Giftbrühen verwandelten. Unsere Erkenntnisse helfen zu erklären, wie es zu diesem verheerenden Massensterben kam – und sie geben Grund zur Sorge angesichts des menschengemachten Klimawandels, der unsere Umwelt heute rapide erwärmt.

Bei unserem Ausflug zu der Felswand sammelten wir viele Fossilien und Gesteinsproben. Das Material, das wir der Kohleschicht entnommen hatten, bestand fast ausschließlich aus komprimierten Blättern, Wurzeln und Sprossachsen von Bäumen der Gattung *Glossopteris*. Diese Gewächse gediehen in Feuchtgebieten des Perms, wo sie sich nach ihrem Absterben zu Torf zersetzten.

In den Sedimenten direkt oberhalb der Kohlelage fanden wir praktisch keine Fossilien: weder Überreste von Blättern oder Wurzeln noch von anderen Organen beziehungsweise Organismen. Was es jedoch gab, waren gekrümmte, sandgefüllte Hohlräume mit einer Länge bis zu zwei Metern. Auf Grund ihrer Form vermuten wir, dass sie einst von kleinen Reptilien gegraben worden sind, die etwa so groß waren wie heutige Beutelratten oder Mulle. Diese emsigen Buddler bewohnten offenbar die morastigen Sedimente der frühen Trias und müssen somit das Massensterben am Ende des Perms überlebt haben. Wahrscheinlich hatte das mit ebenjener Vorliebe für Schlamm zu tun: Sich einzugraben, dürfte ihnen Schutz vor den damaligen hohen Temperaturen geboten haben.

Wenn jegliche mit bloßem Auge erkennbaren Fossilien fehlen, wie in den von uns untersuchten Schichten der Trias, ist dies für die meisten Paläontologen ein hinreichender Grund, sich anderen Forschungsobjekten zuzuwenden. Wir aber vermuteten, dass uns das Sediment durchaus eine Geschichte zu erzählen hat – nur eben eine, die sich in Strukturen verbirgt, welche nicht auf Anhieb sichtbar sind. Aus den Gesteinsproben dieses Tages und weiteren, die wir aus Felsschichten desselben Alters rund um Sydney gesammelt hatten, stellten wir drei gleichartige Sätze zusammen. Einen davon schickten wir an Jim Crowley von der Boise State University und Bob Nicoll von der Forschungsorganisation Geoscience Australia, die sich bereit erklärt hatten, die Proben so präzise wie

AUF EINEN BLICK

Vorzeitliche Umweltkatastrophe

- 1** Am Ende des Perms, vor rund 252 Millionen Jahren, kam es zu einem der ausgeprägtesten Massenaussterben der Erdgeschichte. Rund drei Viertel aller Tierarten verschwanden.
- 2** Der ökologische Kollaps ging mit einem rasanten Klimawandel einher. In den Gewässern bildeten sich Planktonblüten, die das übrige Leben erstickten und vergifteten.
- 3** Je mehr wir über die damaligen Ereignisse herausfinden, umso deutlicher zeigt sich, welche Risiken der heutige menschengemachte Klimawandel birgt.

möglich zu datieren. Der zweite Satz ging an unsere Kollegin Tracy Frank von der University of Connecticut; sie rekonstruierte daraus die Temperaturen im späten Perm. Das dritte Paket nahmen wir selbst mit ins Schwedische Museum für Naturgeschichte, um die Proben auf mikroskopische Fossilien von pflanzlichen Sporen und Pollen sowie von Algen und Bakterien zu durchforsten. Wir hofften, all das würde es uns ermöglichen, den ökologischen Zusammenbruch am Ende des Perms und die spätere Erholung davon detailliert aufzuklären.

Als die Wälder verschwanden

Wie erwartet ergab unsere Mikrofossilienanalyse, dass die Menge der pflanzlichen Sporen und Pollen genau an der Obergrenze der permischen Kohleschicht rapide abfällt – das sichere Anzeichen einer nahezu vollständigen Entwaldung der Landschaft. Zu unserer Überraschung ging aus den Daten aber noch etwas anderes hervor: Planktonorganismen wie Algen und Bakterien hatten sich schon bald nach dem großen Aussterben drastisch vermehrt. Sie erreichten offenbar Konzentrationen, wie sie für heutige toxische Algenblüten typisch sind (siehe »Spektrum« Juni 2022, S. 32). Weil ein explosionsartiges Mikrobenwachstum dem Wasser Sauerstoff entzieht und überdies viele Algen und Bakterien giftige Stoffe freisetzen, kann es unzähligen Tieren den Tod bringen. Wir fragten uns, warum sich das Plankton am Ende des Perms so stark vervielfältigte und welche Folgen das für die Biosphäre hatte. Um das zu beantworten, benötigten wir weitere Informationen.

Die Untersuchung der beiden anderen Probensätze entpuppte sich als hilfreich. Die Altersbestimmung bestätigte, dass der ökologische Kollaps am Ende des Perms



mit einer enormen vulkanischen Aktivität auf dem Gebiet des heutigen Russlands zusammenfiel. Wobei der Begriff »vulkanisch« eigentlich zu zahm klingt, um das damalige Geschehen zu beschreiben: Wo sich heute der Sibirische Trapp befindet, ein ausgedehnter Flussbasalt, trat zu jener Zeit heißes Magma mit einem Volumen von mehreren Millionen Kubikkilometern zu Tage. Ein solches Ereignis verhält sich zu dem, was wir üblicherweise unter einem Vulkanausbruch verstehen, wie eine Tsunami-Flutwelle zu Wasserkräuselungen in der Badewanne.

Viele Forscherinnen und Forscher sind überzeugt: Der gewaltige Ausbruch, der den Sibirischen Trapp hervorbrachte, löste das Massenaussterben am Ende des Perms aus. Sie verweisen dabei vor allem auf die Zusammensetzung des Gesteins in der Region. Die Sedimente vor dem vulkanischen Großereignis waren dort reich an Kohle, Erdöl und Erdgas. Die Hitze der massenhaft freigesetzten Lava entzündete jene Kohlenwasserstoffe oder ließ sie verdampfen, so dass gewaltige Mengen Treibhausgase in die Atmosphäre gelangten. Deren CO₂-Gehalt stieg dadurch um das Sechsfache.

Die extreme Vulkanaktivität am Ende des Perms ließ den atmosphärischen CO₂-Gehalt um das Sechsfache steigen – mit verheerenden ökologischen Folgen

Zu diesen Befunden passen die geochemisch basierten Temperaturschätzungen, die Tracy Frank für die Übergangsperiode vom Perm zur Trias vorgenommen hat. Demnach kletterten die mittleren Lufttemperaturen damals um 10 bis 14 Grad Celsius nach oben. Zudem erlauben die Proben, zu ermitteln, in welchen Zeiträumen sich der Wandel vollzog: Der Temperaturanstieg und der ökologische Kollaps erfolgten innerhalb weniger Jahrzehntausende – eine nach geologischen Maßstäben schnelle Umweltveränderung, die Tiere gemäßiger Zonen aussterben ließ oder zum Rückzug in den kühleren Untergrund zwang. Die galoppierende Erwärmung jener Zeit erklärt, warum sich in den Süßgewässern die großflächigen Algen- und Bakterienblüten ausbreiteten, auf die unsere Mikrofossilien-Analyse hindeutet. Die Herrschaft des Schleims hatte begonnen.

Hoher atmosphärischer CO₂-Gehalt, warme Umgebung und reichliches Nährstoffangebot: Diese drei Faktoren verwandelten Flüsse und Seen während des ausgehenden Perms in giftige Brühen. Exzessiver Vulkanismus lieferte die ersten beiden Zutaten. Der großflächige Waldverlust steuerte die dritte bei, denn mit dem Absterben der Bäume ging das Wurzelwerk zu Grunde, das die Böden stabilisiert hatte – worauf mehr Erde in Flüsse und

Seen gespült wurde und mit ihr zahlreiche Nährstoffe, die das Mikробenwachstum förderten. Da es infolge des ökologischen Kollapses kaum noch Fische und wirbellose Wassertiere gab, die Plankton fraßen, vermehrten sich die Mikroorganismen während der folgenden Jahrtausende enorm. Es kam zu außerordentlich starken Bakterien- und Algenblüten, die giftige Stoffwechselprodukte freisetzen und damit offenbar lange Zeit verhindern, dass die dezimierte Tierwelt ihre einstige Vielfalt wiedererlangte.

Der Kollaps im späten Perm war für das irdische Leben verheerend, doch er ist nur eines von vielen Aussterbereignissen, die mit globaler Erwärmung einhergingen. Tatsächlich hingen die meisten Massenaussterben der Erdgeschichte mit einem schnellen und anhaltenden, durch CO₂ verursachten Klimawandel zusammen. Es überrascht somit nicht, dass sich Hinweise auf ein explodierendes Mikробenwachstum bei mehreren von ihnen finden lassen. Nimmt man alle vorliegenden Daten zusammen, zeigt sich eine klare Dosis-Wirkungs-Beziehung: Je heftiger die Klimaerwärmung, desto stärkere Planktonblüten sind nachweisbar. Der Übergang vom Perm zur Trias war diesbezüglich besonders ausgeprägt.

Wir verglichen ihn sodann mit dem berühmtesten Massenaussterben der Erdgeschichte, dem am Ende der Kreidezeit vor 66 Millionen Jahren, als die meisten größeren Wirbeltiere verendeten – darunter alle Dinosaurier mit Ausnahme der Vögel und zahlreiche weitere landlebende, marine und fliegende Spezies. Zwar ist bekannt, dass es auch in jener Phase der Erdgeschichte immer wieder zu gewaltigen Vulkanausbrüchen kam, doch gilt als Ursache des Massenaussterbens der Einschlag eines Meteoriten von mindestens 10 Kilometer Durchmesser. Der Brocken war bis zu 20 Kilometer pro Sekunde schnell und krachte vor der heutigen Küste Mexikos auf die Erdoberfläche. Es entstand eine gigantische Wolke aus Staub, Ruß und Aerosolen, die sich um den gesamten Globus verbreitete. Sie dürfte das Wachstum fotosynthetischer Mikroorganismen zunächst behindert haben. Sobald die Sonne wieder durchbrach, vermehrte sich das Plankton, aber lediglich in begrenztem Ausmaß – wahrscheinlich, weil sowohl der globale CO₂-Gehalt als auch die weltweite Mitteltemperatur nur relativ mäßig stiegen.

Die Zutaten für eine globale Katastrophe

Zusammengefasst bedeutet das: Ohne galoppierende Klimaerwärmung kommt es nicht zu einer Weltherrschaft der Mikroben. Vergleicht man deren Aufblühen an der Perm-Trias-Grenze mit dem am Ende der Kreidezeit, zeigt sich, dass es einer hohen CO₂-Konzentration ebenso wie gestiegener Temperaturen bedarf, damit Algen und Bakterien über lange Zeiträume hinweg immer wieder toxische Blüten hervorbringen. Dieser Befund ist erhellend und alarmierend zugleich: Einerseits liefert er eine plausible Erklärung, warum es im Zuge erdgeschichtlicher Katastrophen zum massenhaften Artensterben in Süßgewässern kam. Andererseits bedeutet er, dass drastische Einbrüche der Biodiversität leichter auszulösen sind,

Katastrophales Mikrowachstum

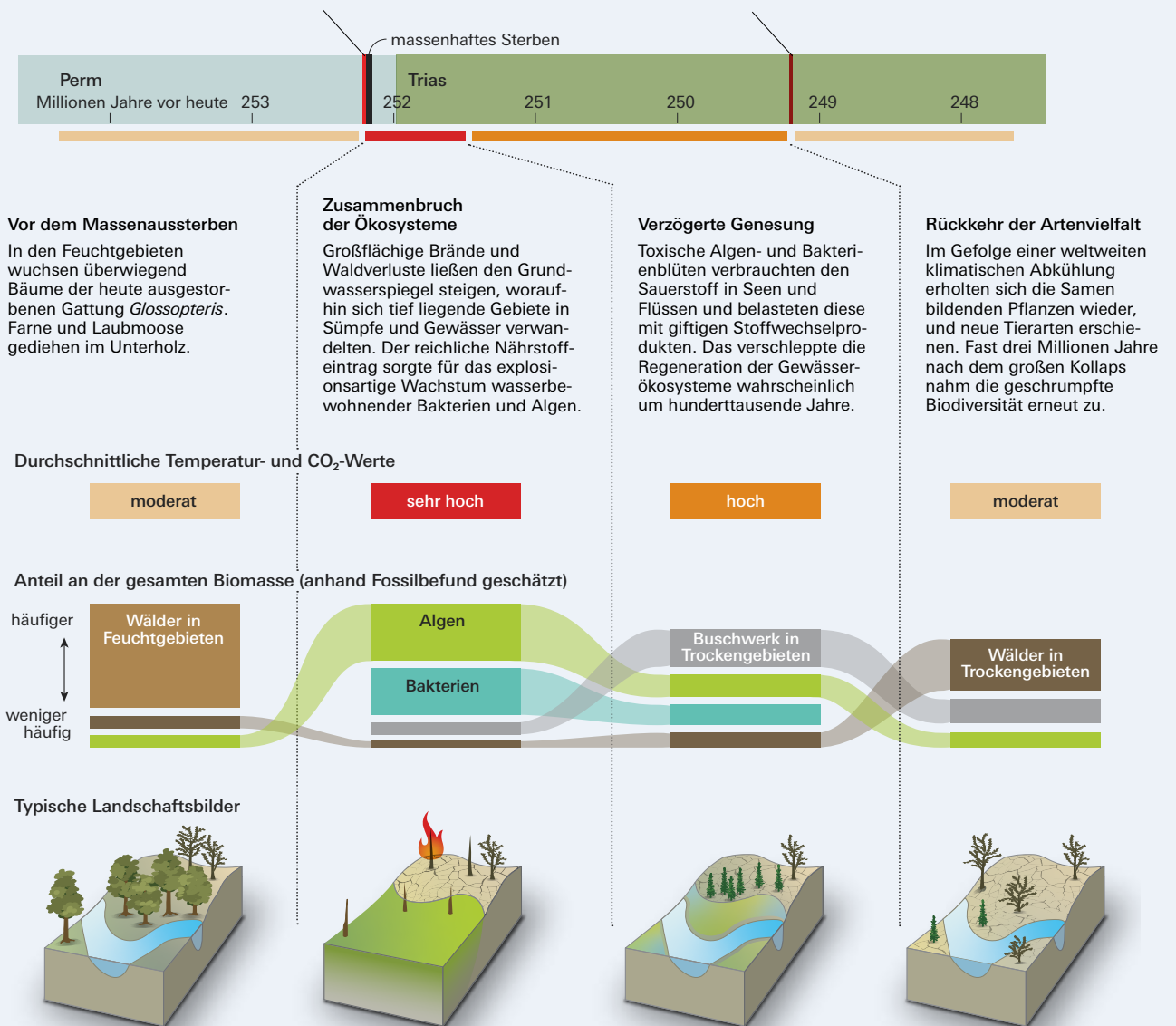
Paläontologen wissen seit Langem, dass am Ende des Perms ein galoppierender Klimawandel eintrat, der die terrestrischen und marinen Ökosysteme weitgehend unbewohnbar machte. Flüsse und Seen verwandelten sich in Giftbrühen, wie Untersuchungen an fossilhaltigen Gesteinsschichten in Australien belegt haben. Toxische Algen- und Bakterienblüten machten das Wasser zur lebensfeindlichen Zone – zumindest für komplexe Vielzeller. Der Kollaps der Süßwasserökosysteme trug dazu bei, dass sich die weltweit geschrumpfte Artenvielfalt nur langsam wieder erholte.

Massenaussterben am Ende des Perms

Rasche Erderwärmung und steigender CO₂-Gehalt der Luft löschten mehr als 70 Prozent der landlebenden Tierarten aus sowie 80 Prozent der marinen.

Schleppende Erholung

Es vergingen fast drei Millionen Jahre, bis die Temperaturen und der atmosphärische CO₂-Gehalt auf ein moderates Niveau zurückgekehrt waren, das eine Regeneration der Ökosysteme ermöglichte.



JEN CHRISTIANSEN, NAOJI MAYS, C. ET AL.: LETHAL MICROBIAL BLOOMS DELAYED FRESHWATER ECOSYSTEM RECOVERY FOLLOWING THE END-PERMIAN EXTINCTION. NATURE COMMUNICATIONS 12, 2021 / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2022, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



INVASION DES PLANKTONS Toxische Algenblüten, bei denen sich giftige Mikroben massenhaft vermehren, treten in Gewässern rund um den Globus immer häufiger auf – verursacht von steigenden atmosphärischen CO₂-Konzentrationen, der weltweiten Erwärmung und übermäßigem Nährstoffeintrag.

als wir bisher annahmen, und offenbar häufig mit einem raschen Anstieg des atmosphärischen CO₂-Gehalts beginnen.

Heute liefern wir Menschen massenhaft Zutaten für Planktonblüten. Die ersten beiden Ingredienzien – Kohlenstoffdioxid und globale Erwärmung – sind Nebenprodukte dessen, dass unsere Zivilisation seit rund 200 Jahren fossile Brennstoffe verfeuert. Dabei wandeln wir unterirdisch eingelagerte Kohlenwasserstoffe in atmosphärische Treibhausgase um, und zwar jährlich dutzende Milliarden Tonnen davon: weitaus mehr, als alle Vulkane der Welt zusammen ausstoßen. Die dritte Zutat, die Nährstoffe, leiten wir mit landwirtschaftlichen Düngemitteln, Gülle und Fäkalien in die Gewässer ein – sowie mit Boden, der nach Abholzungen erodiert. Infolgedessen treten toxische Algenblüten immer öfter auf (siehe »Spektrum« Juni 2022, S. 32). Sie verursachen Verluste in der Fischerei, erschweren die Trinkwasserversorgung und führen zu wachsenden Ausgaben im Gesundheitssektor, was sich mittlerweile auf viele Milliarden Dollar jährlich summiert.

Waldbrände können und werden das Problem weiter verschärfen. In unserer sich erwärmenden Welt treten Dürreperioden immer häufiger auf und gewinnen zudem an Intensität. Selbst in traditionell wasserreichen Regionen wie den Torfwäldern Indonesiens oder dem Pantanal-Feuchtgebiet Südamerikas kommt es vermehrt zu großflächigen Bränden. Entflammte Wälder erhöhen den Nährstoffeintrag ins Wasser gleich mehrfach: Sie legen Boden frei, so dass er verstärkt erodiert; sie sorgen dafür, dass Asche und anderes verbranntes Material in die Flüsse gelangt; und sie schleudern immense Mengen an Ruß und Mikronährstoffen in die Atmosphäre, die später über Meeren und Süßgewässern niedergehen. Neuere Forschungsstudien haben für den Westen der USA nachgewiesen, dass dort nach Waldbränden mehr Algenblüten in den Flüssen auftreten. Und im Gefolge der verheerenden australischen Buschbrände 2019 und 2020 kam es zu einer großflächigen Planktonblüte im Ozean, wie zu erwarten auf der windabgewandten Seite des Kontinents.

Waldbrände dürften auch in der fernen Vergangenheit dazu beigetragen haben, aquatische Mikroorganismen mit Nährstoffen zu versorgen. Als wir die fossilen Schichten des späten Perms und der frühen Trias untersuchten, fanden wir diverse Spuren von Holzkohle – ein deutliches Zeichen dafür, dass die damaligen Wälder brannten. Die daraus resultierende Bodenerosion könnte ebenso wie die großflächige Streuung der Flugasche enorme Nährstoff-

mengen in die Gewässer eingetragen haben, was die Vermehrung von Bakterien und Algen begünstigt hätte.

Der Blick auf frühere Massenaussterben hält einige Lehren für die Gegenwart und die Zukunft bereit. Dazu gilt es zwei grundlegende Prämissen der Geowissenschaften zu beachten. Erstens: Atmosphäre, Hydrosphäre, Geosphäre und Biosphäre hängen untrennbar zusammen. Verändert sich eine von ihnen, reagieren die anderen darauf, und zwar in vorhersagbarer Weise. Zweitens: Dieses Prinzip galt in der erdgeschichtlichen Vergangenheit genauso, wie es heute gilt. Auf diese Grundannahmen stützt sich der Weltklimarat IPCC, wenn er die Ursachen und Folgen der globalen Erwärmung einschätzt.

In die Vergangenheit blicken, um in die Zukunft zu sehen

Auf der Basis von Eis-, Gesteins- und Fossilienanalysen kommt der IPCC zu dem Schluss, dass es atmosphärische CO₂-Konzentrationen, wie sie heute gemessen werden, seit mindestens zwei Millionen Jahren nicht mehr gegeben hat. Daraus resultieren diverse Fragen: Wie hoch war der Meeresspiegel in Zeiten vergleichbaren CO₂-Gehalts? Wie schnell verwitterten damals die Böden? Wie sah die Waldbedeckung aus? Mit anderen Worten: Welche Folgen hatte die höhere Kohlenstoffdioxidkonzentration für die Ozeane, das Land und die Lebewesen? Wir brauchen dringend Antworten darauf, angesichts der bereits jetzt auf 415 ppm (Teile pro Million) gestiegenen CO₂-Konzentration. Ganz zu schweigen von den 800 oder 900 ppm, die wir voraussichtlich im Jahr 2100 haben werden, wenn die Menschheit weiterhin fossile Energieträger wie im derzeitigen Umfang verbrennt. Je mehr der atmosphärische CO₂-Gehalt steigt, desto länger müssen wir in die Vergangenheit zurückblicken, um abzuschätzen, was uns erwarten könnte. Die fossilen Spuren früherer Klimaerwärmungen werden mithin immer wichtiger für uns.

Vergleiche zwischen dem späten Perm und der heutigen Zeit versagen in mindestens zwei wesentlichen Punkten – jedoch sind diese Diskrepanzen nicht unbedingt beruhigend. Erstens war das Tempo der Erwärmung damals ein anderes. Wir und andere Forschungsgruppen haben belegt, dass sich die atmosphärische CO₂-Konzentration am Ende des Perms in etwa 10 000 Jahren versechsfachte. Der momentane menschengemachte Anstieg des CO₂-Gehalts dagegen wird, wenn er im gegenwärtigen Tempo weitergeht, die gleiche Zunahme in nur wenigen hundert Jahren herbeiführen.

Der zweite wesentliche Unterschied ist der Faktor *Homo sapiens*. Zwar ähneln die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten oberflächlich betrachtet den natürlichen Folgen eines (extrem ausgeprägten) Vulkanismus oder Meteoriteneinschlags. Doch die Vielfalt der zusätzlichen ökologischen Stressfaktoren, die von uns Menschen ausgehen – darunter Abholzung, Wilderei, Überdüngung, Biotopzerstörung, Einschleppung invasiver Arten –, ist erdgeschichtlich beispiellos. Aus diesen Gründen sind zahlreiche Wissenschaftler überzeugt: Der Blick auf

extreme Erwärmungsphasen in der Geschichte des Planeten wie die im späten Perm kann zwar einen Eindruck davon vermitteln, was uns infolge des menschengemachten Klimawandels bevorsteht, aber wir sollten heute mit eher noch schwereren Folgen rechnen.

Die Fossilien haben uns eine Botschaft mitzuteilen, und sie lautet: Die schnelle, massenhafte Freisetzung von Treibhausgasen allein genügt, um zahlreiche Arten aussterben zu lassen. Es spielt keine Rolle, woher diese Gase kommen. Ob aus Vulkanen, auftauendem Permafrost, Flugzeugtriebwerken oder Kohlekraftwerken – die Konsequenzen sind stets die gleichen. Berücksichtigen wir außerdem die zahlreichen weiteren anthropogenen Stressfaktoren, sieht die langfristige Prognose für die Artenvielfalt ziemlich düster aus.

Noch haben wir es in der Hand. Im Gegensatz zu den Spezies, die bei vorzeitlichen Massenaussterben untergingen, können wir der Katastrophe mit Verhaltensänderungen, intelligenter Nutzung von Technologie und Innovationen entgegenwirken. Einen ökologischen Kollaps wie dem in den Süßgewässern des Perms können wir verhindern, indem wir Umweltverschmutzung vermeiden und die Treibhausgasemissionen massiv reduzieren.

Es mehren sich die Anzeichen dafür, dass wir derzeit in das sechste Massenaussterben der Erdgeschichte eintreten. Planktonblüten, Korallenbleichen, Meeresversauerung und immer neue Rekordtemperaturen sind alltäglich geworden – zu schweigen von Überfischung, großflächigen Bränden, Gletscherschmelze, Abgasen und Plastikmüll. Welchen Rang das von uns verursachte Artensterben unter den großen erdgeschichtlichen Katastrophen letztlich einnehmen wird, hängt erstmals in der Historie des Planeten von einer einzigen Spezies ab. ◀

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

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



EPPFRIEDHUBER / GETTY IMAGES / ISTOCK

QUELLEN

Fielding, C. R. et al.: Age and pattern of the southern high-latitude continental end-Permian extinction constrained by multiproxy analysis. *Nature Communications* 10, 2019

Gulbranson, E. L. et al.: Paleoclimate-induced stress on polar forested ecosystems prior to the Permian-Triassic mass extinction. *Scientific Reports* 12, 2022

Mays, C. et al.: Lethal microbial blooms delayed freshwater ecosystem recovery following the end-Permian extinction. *Nature Communications* 12, 2021

Fischerei im Umbruch

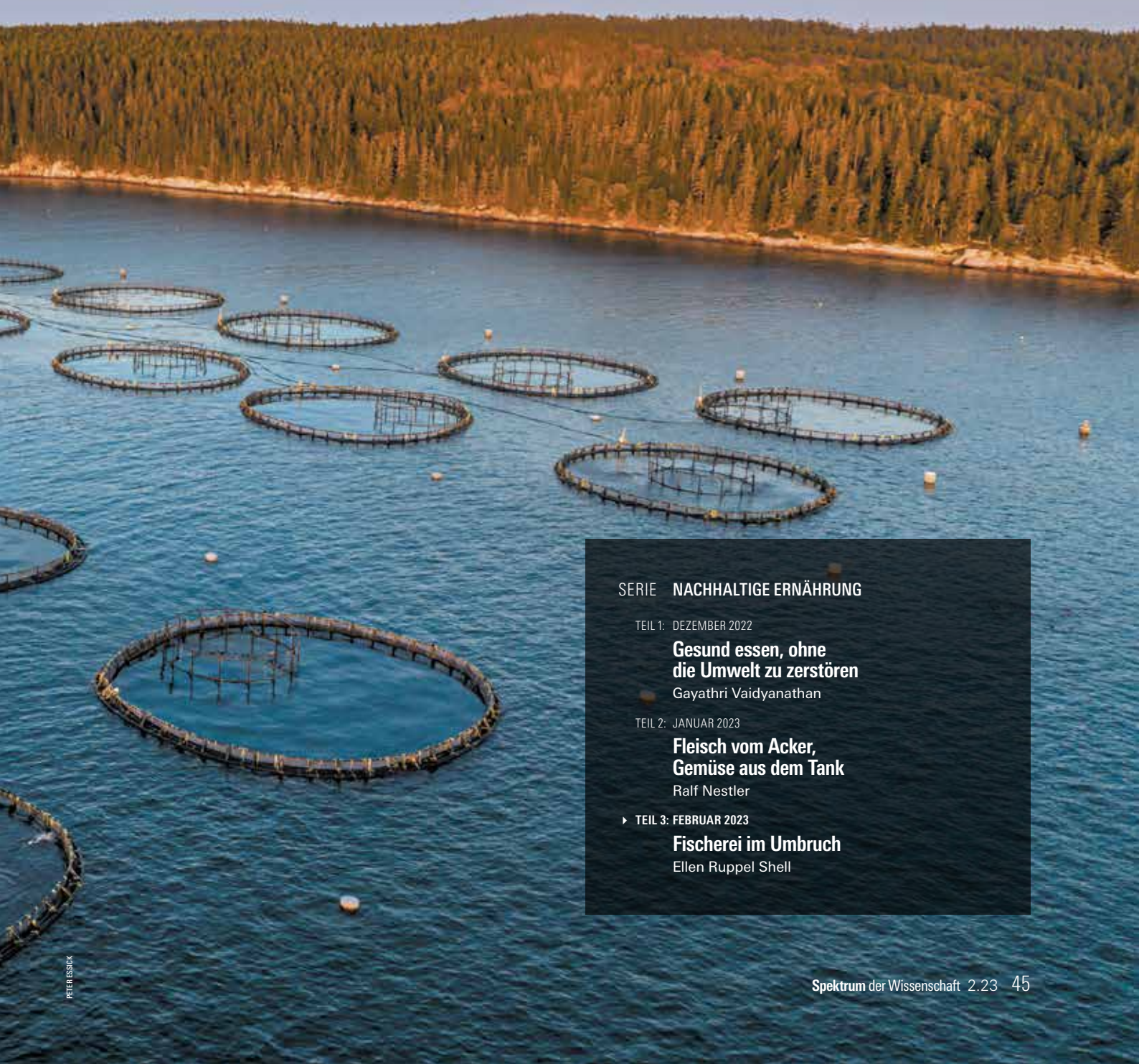
UMSTRITTENE PRAXIS In den von Cooke Aquaculture betriebenen Lachsnetzen vor Black Island im US-Bundesstaat Maine kam es im Jahr 2021 zu einem massiven Lachssterben. Mehr als 100 000 Fische verendeten. Ursache war laut dem Unternehmen ein ungewöhnlich niedriger Sauerstoffgehalt in den Netzgehegen.

Weltweit sinken die Bestände an Meerestieren. Für unsere künftige Ernährung sind sie jedoch essenziell. Verschiedene neue Methoden sollen es ermöglichen, deutlich mehr Fische und Muscheln zu züchten als bisher – und das unter Schonung der Umwelt und Ökosysteme. Einige davon sind bereits sehr erfolgreich.

» spektrum.de/artikel/2085729



Die Journalistin **Ellen Ruppel Shell** schreibt über Wissenschaft, Wirtschaftspolitik und soziale Gerechtigkeit. Sie ist Professorin für Wissenschaftsjournalismus an der Boston University.



SERIE **NACHHALTIGE ERNÄHRUNG**

TEIL 1: DEZEMBER 2022

**Gesund essen, ohne
die Umwelt zu zerstören**

Gayathri Vaidyanathan

TEIL 2: JANUAR 2023

**Fleisch vom Acker,
Gemüse aus dem Tank**

Ralf Nestler

► TEIL 3: FEBRUAR 2023

Fischerei im Umbruch

Ellen Ruppel Shell

► An einem kühlen Frühlingmorgen begleite ich Carter Newell und seine zweiköpfige Crew zur Arbeit. Unser Ziel ist eine der produktivsten Muschelfarmen im Bundesstaat Maine an der US-amerikanischen Ostküste. Eine kurze Bootsfahrt bringt uns zu einem großen Schiff, 18 Meter lang und sieben Meter breit. Der promovierte Meeresbiologe Newell hat es nach dem walisischen Küstenort Mumbles benannt, an dem er früher geforscht hat. Der Kahn ist an einem stählernen Floß vertäut, von dem aus Hunderte von Seilen, jedes gut 13 Meter lang, ins Wasser hängen. Sie sind mit tausenden Miesmuscheln in verschiedenen Entwicklungsstadien übersät.

Ich zittere im beißenden Wind, als ein Besatzungsmitglied vom Schiff aus auf das schwankende Floß steigt und nachsieht, welche Muschelseile bereit für die Ernte sind. Newell bleibt auf dem Boot und zieht mit einem fünf Meter hohen Kran die gekennzeichneten Seile hoch. An jedem kleben in baumartigen Verzweigungen etwa 3000 Miesmuscheln. Eine überdimensionale Bürste fegt sie in einen riesigen Edelstahlimer, woraufhin sie eine andere Maschine in einen Sack aus Polyethylen füllt. Von dort aus werden sie wiederum auf ein Förderband geschüttet und geschrubbt, sortiert und verpackt. Newell hat diese Apparatur über Jahrzehnte hinweg in einem kostspieligen Prozess durch Ausprobieren entwickelt. Zahlreiche Herausforderungen musste er auf dem Weg dorthin meistern, etwa die Tiere vor Seegang und gefährlichen Eiderenten schützen.

Während er die morgendliche Ernte beaufsichtigt, spricht Newell über die Dynamik des Phytoplanktons, warum die Nitratkonzentration des Wassers im Winter ansteigt und wie sich der Chlorophyllgehalt für die gesamte Küste von Maine anhand von nur drei Satellitenbildern bestimmen lässt. Vor allem aber spricht er über Miesmuscheln: ihren Lebenszyklus, ihre geografische Verbreitung, ihre Zubereitung (nicht an Knoblauch sparen!),



DIE MUSCHELN werden an langen Seilen gezüchtet, die von einem Floß ins Wasser baumeln (oben). Dann hieven Arbeiter die Seile an Bord (rechts).

PETER ESSRICK

und wie man sie am besten züchtet, ohne Konkurs zu gehen. »Mit der Fischzucht verdient man kein schnelles Geld«, lautet sein Fazit.

Tatsächlich könnte sie aber bald die einzige verbleibende Möglichkeit sein, mit der Maines ums Überleben kämpfende Meeresfrüchteindustrie überhaupt noch Geld verdienen kann. Durch Überfischung, Parasiten, steigende Meerestemperaturen und weitere Bedrohungen befinden sich fast alle kommerziellen Fischereien in dem US-Bundesstaat im freien Fall. Die Fangzahlen von Kabeljau und Garnelen brechen ein. Wurden in den letzten Jahrzehnten noch durchschnittlich gut 11 000 Tonnen Wildmuscheln gefangen, sind es heute lediglich vier. Und die Hummer, der bei Weitem profitabelste Fang des Staates, wandern nach Norden in die kühleren kanadischen Gewässer ab.

Ökologischer und ertragreicher

Die Zucht von Wasserpflanzen und -tieren könnte den ersehnten Ausweg aus dieser Misere bieten, nicht nur für die Fischer von Maine, sondern nach Ansicht mancher Experten für die Meeresfrüchteproduktion weltweit. Newell gehört zu einer neuen Generation von Wissenschaftlern, die wirtschaftlich und ökologisch nachhaltige Ansätze für die Fischzucht verfolgen. Seine Muschelzuchtkonstruktion bringt dreimal so viel Ertrag wie herkömmliche Farmen. Und da die frei schwimmenden Muschellarven die Seile auf natürliche Weise besiedeln

AUF EINEN BLICK

Muscheln statt Fisch

- 1** Der weltweite Bedarf an Meeresfrüchten steigt. Gleichzeitig schwinden die Bestände von Fischen, Muscheln und Co durch Krankheiten, steigende Ozeantemperaturen und Überfischung.
- 2** Massenzuchtformen wie Netzgehege vor der Küste oder landgestützte Farmen bringen Fisch in großen Mengen hervor, sind aber wenig artgerecht und verursachen Umweltprobleme.
- 3** Ein nachhaltige Alternative könnte die Aufzucht von Muscheln sein. Erste experimentelle Ansätze zeigen sich viel versprechend.



und alles Phytoplankton fressen, das ihnen in die Quere kommt, muss Newell weder Futter noch Energie bereitstellen. Ein Segen, sowohl für die Umwelt als auch für ihn als Unternehmer.

Damit ist der Biologe bislang die Ausnahme. Die Aquakultur hat nicht umsonst einen schlechten Ruf: In der Vergangenheit hat man die intensive Fischzucht mit vielen negativen Aspekten in Verbindung gebracht, vom Rückgang der Artenvielfalt und dem Verlust von Lebensräumen bis zum übermäßigen Einsatz von Antibiotika und Missständen bei der Tierhaltung.

Stark umstritten ist vor allem die Aufzucht großer Flossenfische wie Lachs. Einst war der Atlantische Lachs in Hülle und Fülle vor den Küsten Maines anzutreffen. Doch Staudämme, Überfischung, Parasiten und Verschmutzung haben dazu geführt, dass die Fischerei nach Atlantischem Lachs 1948 eingestellt wurde. Heute ist es verboten, ihn dort zu fangen oder zu verkaufen. Mehr als 95 Prozent des in den USA verkauften Atlantischen Lachses stammen daher aus ausländischer Zucht, meist aus Netzgehegen, die knapp unter der Wasseroberfläche nahe der Küste verankert sind.

Solche offenen Fischgehege kommen in Norwegen seit den 1960er Jahren zum Einsatz und sind auch in

PETER ESSICK



PETER ESSICK

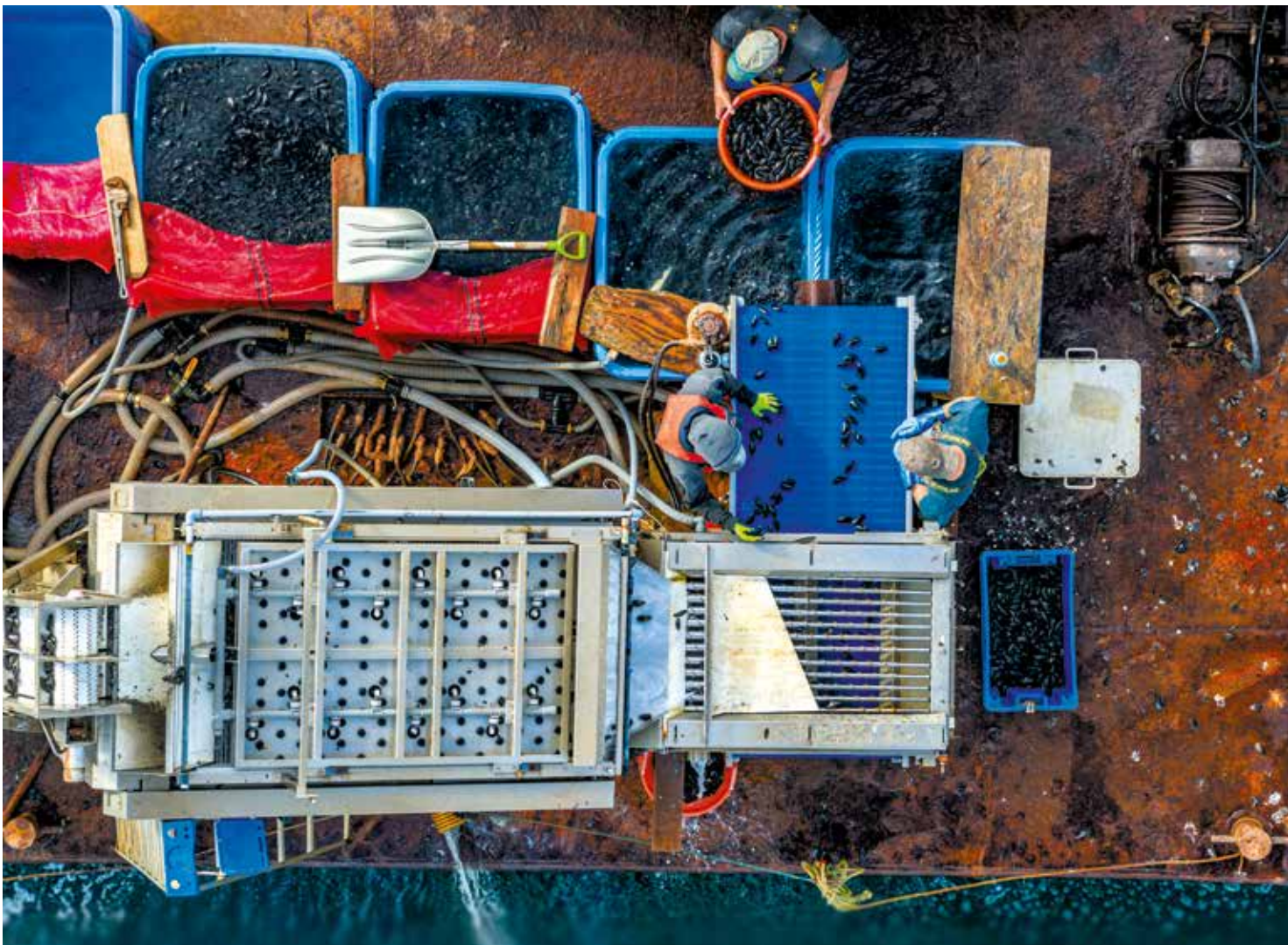
Kanada und Chile in Gebrauch, aber auf Grund von Umweltbedenken sind sie in den meisten US-Küstenstaaten verboten. Ab 2025 wird Maine der einzige Bundesstaat sein, in dem sie noch eingesetzt werden dürfen. Trotz strenger Vorschriften werden Netzgehege jedes Jahr wegen Verstößen gegen Umwelt- und Arbeitsauflagen, Befall mit Fischläusen und anderen Parasiten sowie Infektionskrankheiten beanstandet. Zu einem ebenso großen Problem wird es nach Ansicht von Fachleuten, wenn Zuchtfische aus den Netzen entkommen und sich mit Wildlachsen paaren: Deren Nachkommen können in der Natur nicht überleben. Besonders bedrohlich ist dieser Umstand in Maine, denn hier lebt die letzte verbleibende wilde Atlantiklachs-Population des Landes.

Auch die Fütterung der Fische verschmutzt die Umwelt. Zum einen überfüttern Lachszüchter ihre Bestände manchmal versehentlich. Das überschüssige Futter fördert das Wachstum von Algenblüten, die bei ihrer Zersetzung wiederum den Sauerstoffgehalt des Wassers verringern. So entstehen »Todeszonen« – weite Teile des Meeres, in denen kein Leben mehr möglich ist. Zum anderen bestand ein großer Teil des Fischfutters bis vor Kurzem aus kleinen, wild gefangenen »Futterfischen« wie Anchovis, Heringen und Sardinen. Sie sind reich an langkettigen Omega-3-Fettsäuren, welche die größeren Fische zum Wachsen brauchen. Von 1950 bis 2010 wurden etwa 27 Prozent aller wild gefangenen Fische zu

Fischmehl verarbeitet. Eine schreckliche Verschwendung in den Augen vieler Beobachter: Speisefische an Speisefische zu verfüttern, sei nicht nachhaltig und weder wirtschaftlich noch ökologisch sinnvoll.

Die Suche nach Alternativen gestaltet sich nicht einfach. Da Fleisch fressende Fische Kohlenhydrate nur schwer verdauen können, haben Forscherinnen und Forscher verschiedene Kombinationen aus pflanzlichen Fetten und Proteinen ausprobiert, darunter auch solche aus Sojabohnen. Der Meereskundler David Townsend, Direktor der Abteilung Meereswissenschaften an der University of Maine, vergleicht das Ergebnis mit einer Art veganem Burger für Fische. Doch leider vertragen nicht alle Lachse Soja: Verzehren sie große Mengen davon, können Darm und Immunsystem Schaden nehmen.

Experimentelles Fischfutter soll dieses Problem lösen und ein weiteres gleich dazu: die Verschmutzung der natürlichen Gewässer durch Abfälle aus der Fischhaltung. Neue »schadstoffarme« Futter enthalten viel weniger Stickstoff und Phosphor und liefern die Nährstoffe in einer leicht aufzunehmenden und verdaulichen Form. Dadurch scheiden die Fische weniger der Elemente wieder aus. Zu den neuen Futtermitteln gehören Algenöl, Hefeprotein und Larven der Schwarzen Soldatenfliege. Darüber hinaus entwickeln Fachleute Proteine mit einer Aminosäurezusammensetzung, die der von Fischmehl ähnelt, aber aus Sägemehl und anderen Abfällen aus der Forstwirt-



schaft hergestellt wird. Gleich, ob Algen, Maden oder Sägemehl letztendlich den Fisch in der Nahrungskette der Aquakultur ersetzen werden: Nach Meinung der Wissenschaft sind diese neuartigen Futter viel versprechend. Doch die anderen Risiken, welche die Aufzucht von Fischen in Gehegen auf offener See birgt, bleiben auch mit der Ernährungsumstellung bestehen.

Die Alternative sind vollständig geschlossene Systeme, so genannte Kreislaufanlagen (kurz RAS für »recirculating

PETER ESSICK



NACHDEM MITARBEITER die Seile hochgezogen haben, schabt eine Maschine die Weichtiere ab, und sie werden in Behälter sortiert (links). Newell schneidet eine Miesmuschel auf (oben), um nachzusehen, ob sie gesund ist.

aquaculture systems«). Tausende Tonnen Fische drehen dort kontinuierlich ihre Runden in riesigen Tanks. Die Tiere erhalten eine gleich bleibende Diät aus wissenschaftlich für sie entwickeltem Futter und, falls erforderlich, Medikamenten. Sie schwimmen gegen eine künstlich erzeugte Strömung an und werden bis zu 24 Stunden am Tag mit LED-Licht bestrahlt, damit sie schneller wachsen. Ein surreales Szenario.

Wissenschaftler sind sich einig, dass künftig erheblich mehr Lebensmittel benötigt werden als heute, um die zunehmende Weltbevölkerung zu ernähren. Gezüchtete Fische, Schalentiere und Algen werden dabei höchstwahrscheinlich eine wichtige Rolle spielen. Die Aquakultur ist der am schnellsten wachsende Sektor der Lebensmittelproduktion; er bringt bereits mehr als die Hälfte aller Fischereierzeugnisse hervor (2020 waren das nach Angaben der Welternährungsorganisation 82 von 179 Millionen Tonnen). Meeresfrüchte sind die meistgehandelte Ware auf dem Planeten. Aus Europa stammen zehn, aus Amerika 14 Prozent des weltweit produzierten Fisches. Spitzenproduzent ist China mit einem Anteil von 35 Prozent, davon rund 49 Millionen Tonnen Zuchtfisch.

In jüngster Zeit haben Wissenschaftler und Ingenieure die Kreislaufsysteme zu einer extrem effizienten Proteinproduktionsmaschine weiterentwickelt, die in der Lage ist, mehr Fische schneller und auf weniger Raum zu züchten als in der Natur möglich. Im Gegensatz zu den Netzgehegen vor den Küsten lassen sich Wasserqualität, Temperatur, Zirkulation und andere Umweltvariablen genau kontrollieren. Bakterien wandeln das von den Fischen ausgeschiedene Ammoniak in Nitrat um. Gasaustauschsysteme mischen außerdem Sauerstoff ins Wasser und beseitigen gelöstes Kohlenstoffdioxid, und das Abwasser wird schließlich mikrofiltriert und mit ultraviolettem Licht bestrahlt, um organische Phosphorverbindungen, Bakterien und Viren zu entfernen. Einige der neuesten Systeme überwachen Biomasse und Verhalten der Fische in Echtzeit und optimieren darauf basierend die Fütterung – maschinellen Sensoren und künstlicher Intelligenz sei Dank.

Problematische Lachstanks

Die größte landgestützte Lachsfarm der Welt gehört dem norwegischen Unternehmen Atlantic Sapphire und steht in Homestead im amerikanischen Florida. Die Anlage hat eine Reihe von Krisen hinter sich, darunter ein massives »Sterbeereignis« im März 2021: Vermutlich wegen einer Fehlfunktion der Filter verendeten rund 500 Tonnen Lachs in den Tanks. In der ersten Hälfte des Jahres 2021 meldete das Unternehmen Verluste von mehr als 50 Millionen Dollar und sah sich mit Anschuldigungen wegen krimineller Tierquälerei konfrontiert. Der Vorfall war nicht der erster seiner Art: Bereits ein gutes Jahr zuvor starben in einer dänischen Anlage derselben Firma fast eine Viertelmillion Lachse auf Grund erhöhter Stickstoffkonzentrationen im Wasser, im Juli 2021 kamen dort erneut 400 Tonnen Fische zu Tode.

Die zweitgrößte derartige Anlage soll derzeit in Maine entstehen. In der kleinen Küstenstadt Belfast plant das ebenfalls norwegische Unternehmen Nordic Aquafarms eine 500 Millionen Dollar teure RAS-Farm, die jährlich 33000 Tonnen Atlantischen Lachs produzieren soll. Die Lachseier werden dort in speziell konstruierten Brutkästen ausgebrütet. Die daraus schlüpfenden Larven verbringen die ersten Wochen ihres Lebens damit, ihren Dottersack zu fressen, und kommen anschließend in ein Quarantänebecken. Im weiteren Verlauf werden die Jungfische nacheinander in eine Reihe von Becken umgesiedelt, die den natürlichen Lebenszyklus von Lachsen simulieren – sie schwimmen über einen Zeitraum von 18 bis 20 Monaten vom Süßwasser in immer salzigeres Wasser, bis sie »Marktgröße« erreicht haben. Derzeit, sagt Heim, zirkulieren in dem System fast 21000 Liter Wasser pro Minute: knapp 18000 Liter Salzwasser werden aus dem Golf von Maine entnommen, gut 3000 Liter Süßwasser pumpen die Betreiber aus Grundwasserbrunnen und Wasser führenden Gesteinsschichten. Die herausgefilterten Abfälle werden zu Tierfutter oder Dünger verarbeitet, den wiederum Landwirte zum Anbau von Gemüse nutzen können.

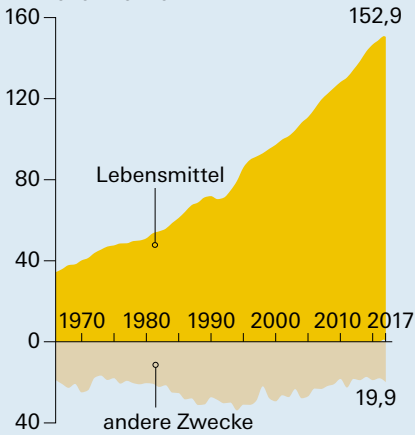
Eine Welt voller Meeresfrüchte

Fisch, Muscheln und Krustentiere werden in gigantischen Mengen geerntet. Im Jahr 2019 (dem letzten Jahr, für das Daten vorliegen) wurden mehr als 177 Millionen Tonnen Meeresfrüchte aus Meer- und Süßwasser gewonnen (Pflanzen nicht mitgezählt). Die Grafiken unten zeigen, welche Regionen und Länder am meisten produzieren und verbrauchen. In den Diagrammen rechts sind die Anteile dargestellt, die aus Zucht (Aquakultur) und aus freiem Fang stammen. Außerdem ist zu sehen, wie sich der Konsum im Lauf der Zeit entwickelt hat.

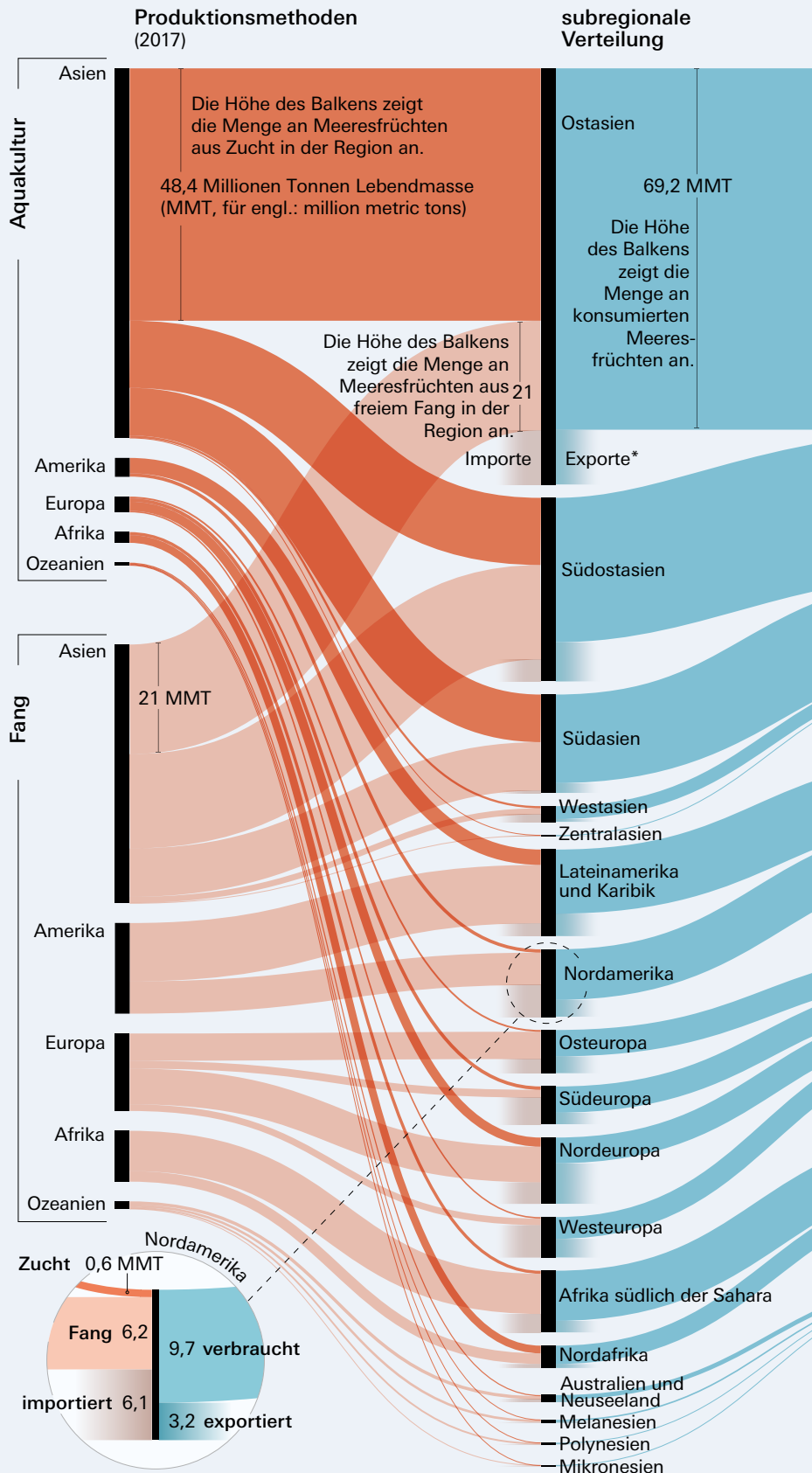
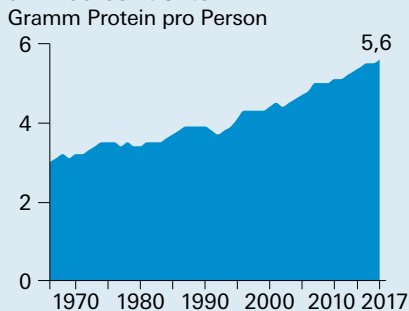
Steigende Nachfrage

Seit den 1970er Jahren ist die konsumierte Menge an Meeresfrüchten gestiegen. Am meisten hat die Nutzung als Lebensmittel zugenommen, während die Verwendung für andere Zwecke (etwa als Tierfutter oder Köder für den Fang anderer Fische) schwankt. Im Durchschnitt hat auch der tägliche Verzehr von Meeresfrüchteprotein zugenommen.

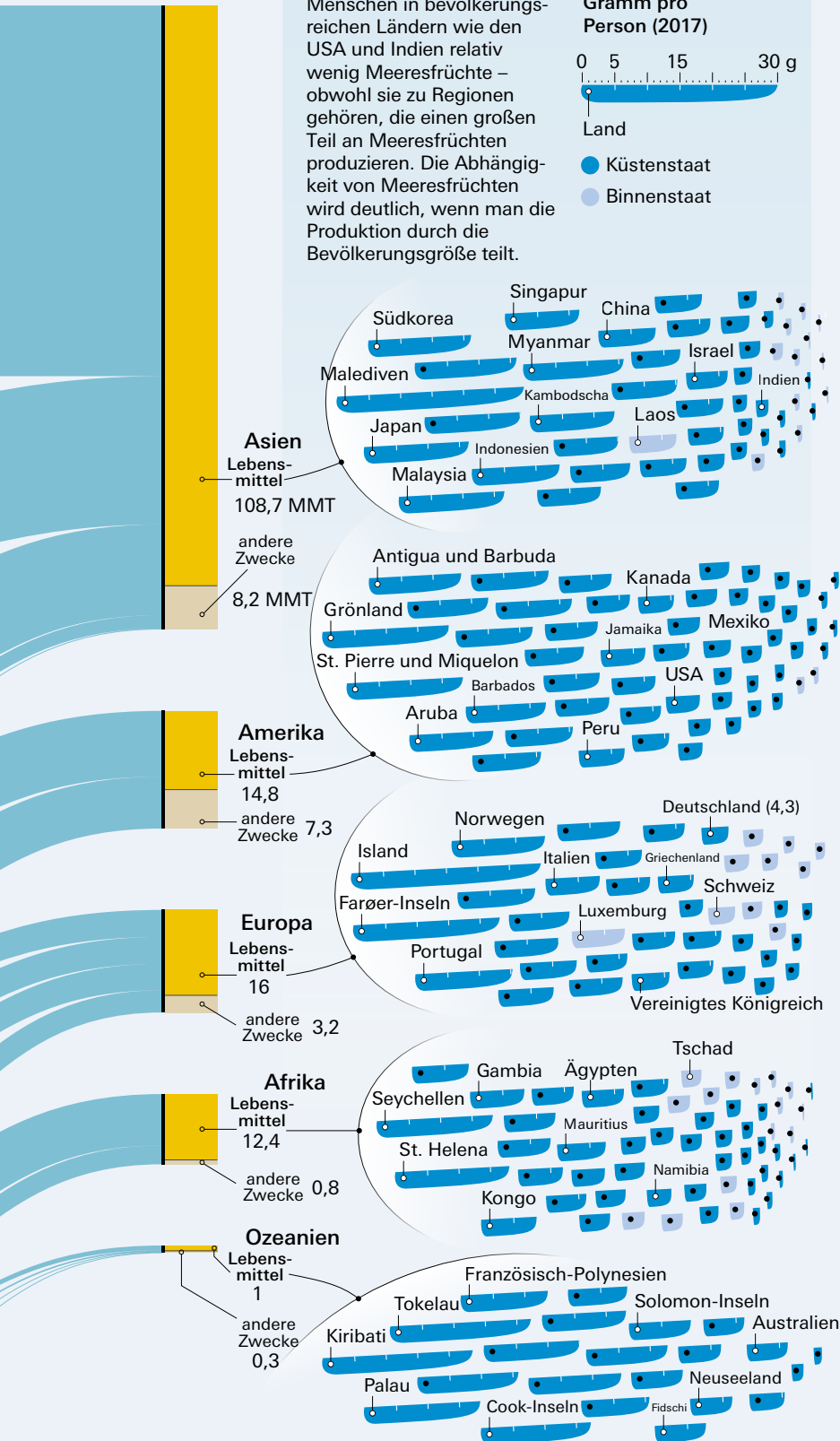
Angebot an Meeresfrüchten



Täglich konsumierte Menge an Meeresfrüchten



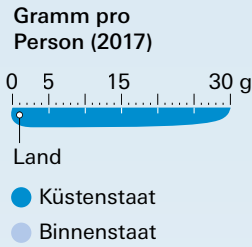
Gesamtangebot nach Region



Meeresfrüchtekonsum nach Ländern

Verglichen mit sehr kleinen Nationen wie Kiribati und weiteren Ländern in Ozeanien, vertilgen die Menschen in bevölkerungsreichen Ländern wie den USA und Indien relativ wenig Meeresfrüchte – obwohl sie zu Regionen gehören, die einen großen Teil an Meeresfrüchten produzieren. Die Abhängigkeit von Meeresfrüchten wird deutlich, wenn man die Produktion durch die Bevölkerungsgröße teilt.

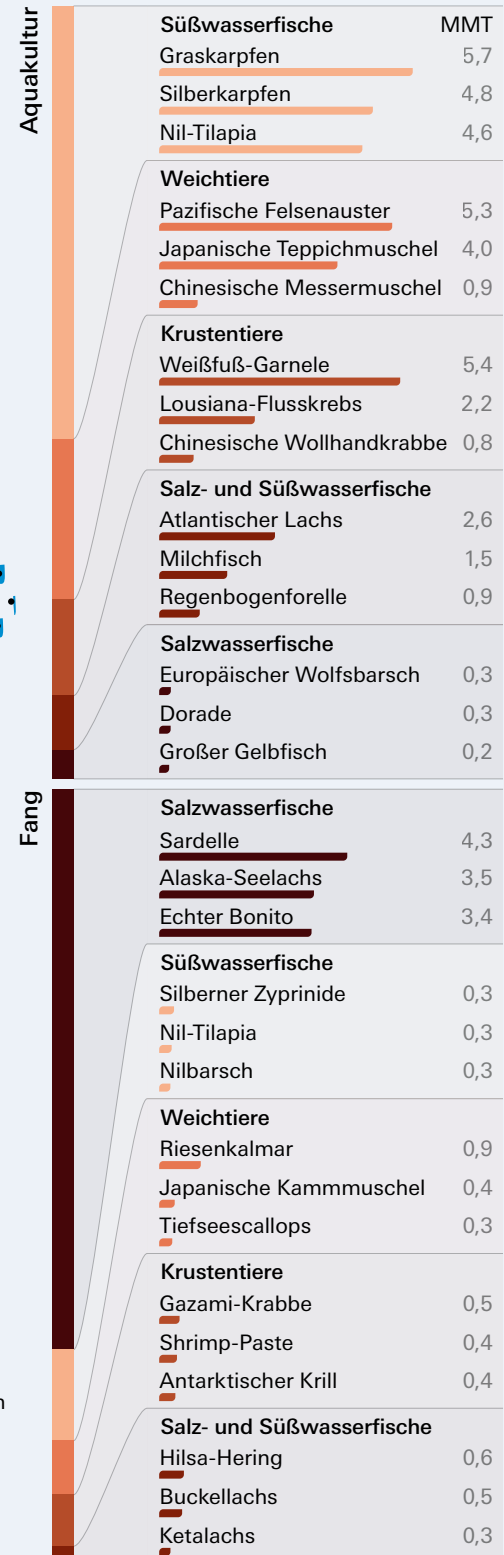
Täglich konsumiertes Meeresfrüchteprotein



Das essen und verwenden wir

Die Reihenfolge der beliebtesten Meeresfrüchte variiert, je nachdem, ob die Tiere aus Zucht oder Fang stammen.

In den USA beliebteste drei Spezies, geordnet nach Gruppe (2017)



Das Pumpen, Filtern, Kühlen und Erwärmen der Wassermassen kostet allerdings viel Energie. »Wir haben keine Daten über den Energieverbrauch dieser Systeme im Vergleich zu anderen Ansätzen, aber er ist eindeutig sehr hoch«, sagt Jon Lewis. Der studierte Biologe leitete zuletzt die Abteilung für Aquakultur im Ministerium für Meeresressourcen des Bundesstaates Maine. Heute berät er eine Nichtregierungsorganisation, die sich für den Erhalt der traditionellen Fischerei in Maine einsetzt und der Aquakultur-Industrie kritisch gegenübersteht. Nach einer Untersuchung, die das Umweltministerium von Maine beauftragt hat, wird die geplante Anlage jedes Jahr 759 000 Tonnen Kohlenstoffdioxid-Äquivalente in die Atmosphäre abgeben. Das entspricht in etwa dem jährlichen Pro-Kopf-CO₂-Ausstoß von 68 000 Deutschen.

Abgesehen davon gibt es grundsätzliche Einwände gegen die Massenaufzucht frei lebender Tiere wie Lachse in Gefangenschaft – gleich, ob in Tanks oder in riesigen Netzen vor der Küste. Die Tiere, die wir gemeinhin gesammelt als »Fische« bezeichnen, sind extrem vielfältig. Einige besitzen höchst komplexe soziale Strukturen und Navigationsfähigkeiten, sagt Becca Franks, die an der New York University zum Verhalten und zum Schutz von Tieren forscht. Der Atlantische Lachs ist solch ein Fisch: Er wandert über 3000 Kilometer zu seinen Laichgründen und wieder zurück und wird dabei allein vom Magnetfeld der Erde und einem scharfen Geruchssinn geleitet. »Die Lachszucht ist das moralische Äquivalent zur Falkenzucht«, schlussfolgert Franks. Sie hat Marker für Stresslevel bei in Gefangenschaft lebenden Lachsen untersucht und fordert, das Leiden und den Stress der Tiere ernst zu nehmen.

Nicht alle Meerestiere sind jedoch mit Raubvögeln vergleichbar. Sandra Shumway, Meereswissenschaftlerin an der University of Connecticut und eine international anerkannte Expertin für die Zucht von Meerestieren, plädiert deshalb dafür, sich auf solche Spezies zu fokussieren, die die Domestizierung gut vertragen: »Ich halte es für sehr wichtig, dass wir mehr Mikronährstoffe und Proteine für den menschlichen Verzehr anbauen. Aber denken wir dabei doch mal an Muscheln.«

Ein Bewegungsdrang wie eine Kartoffel

Muscheln brauchen wenig Platz, und einige – wie Miesmuscheln und Austern – zeigen kaum Bewegungsdrang. »Sie sind eher mit Kartoffeln oder Avocados vergleichbar als mit Lachsen«, sagt Franks. Außerdem lassen sich die Weichtiere ohne künstliche Zufuhr von Dünger, Wasser oder Nahrung züchten. Zuchtaustern beginnen in der Regel als Larven und wachsen dann rasch zu winzigen Saataustern heran, die sich an einer harten Oberfläche wie einer Muschel oder einem Kalkstein festsetzen. In diesem Stadium setzt man sie in das Brackwasser von Flussmündungen um, wo ihnen die Nährstoffe auf natürliche Weise zufließen. Die Tiere sind »Filtererker«: Sie saugen das Wasser durch ihre Kiemen und filtern dabei Phytoplankton heraus, von dem es in Maine mindestens 300 Arten gibt. Dadurch sind die von Muscheln besiedelten Ge-

wässer oft so klar, dass das Sonnenlicht bis weit unter die Oberfläche dringt, was das Wachstum des Phytoplanktons weiter fördert. Einige Wissenschaftler und Landwirte hoffen, auf diesem »positiven Kreislauf« aufbauen zu können, indem sie gezielt Seetang und andere Algen in unmittelbarer Nähe der Muscheln anpflanzen. Damit würden die tierischen Ausscheidungen als Nährstoffe für die Pflanzen dienen, die wiederum CO₂ aus dem Wasser entfernen und Sauerstoff für die Tiere erzeugen.

In den Mündungen und Buchten von Maine vermischt sich das Wasser aus zahlreichen Flüssen mit dem kalten Meerwasser, wodurch Nährstoffe aus der Tiefe nach oben gelangen. Das klingt nach paradiesischen Bedingungen für Muscheln. Doch die niedrige Wassertemperatur erweist sich als ein zweischneidiges Schwert: Die Ozeane speichern bis zu 30 Prozent des weltweiten CO₂-Ausstoßes. Weil sich das Gas in kaltem Wasser besser löst, nimmt dieses weit mehr auf als wärmeres, wodurch es saurer wird. Der zunehmende Säuregehalt in den Flüssen und Flussmündungen von Maine droht aber die Schalen von wirbellosen Tieren wie Muscheln zu zerstören.

Bill Mook hat mit diesem Problem schmerzliche Erfahrungen gemacht. Er ist der Gründer der Mook Sea Farm and Hatchery, einem der beiden größten Austernproduzenten des Bundesstaates, und züchtet reife Austern sowie Saataustern. Vor einigen Jahren stellte er fest, dass sich seine Larven nicht mehr normal entwickelten. Er führte das Problem auf den erhöhten Säuregehalt des Flusswassers zurück, das durch die Brutanlage fließt. Das Wasser machte auch die Schalen der reifen Austern weich, vor



EMPFINDLICHE SPEZIES Bill Mook (rechte Seite), Gründer der Mook Sea Farm in Walpole im US-Bundesstaat Maine, züchtet in speziellen Becken Algen als Austernfutter. Der kleine Betrieb ist in zwei Hütten untergebracht (oben). Manchmal werden die Austern aus einem nahe gelegenen Fluss in diese Aufzuchtstation gebracht, um sie vor dem steigenden Säuregehalt des Flusswassers zu schützen.



PETER ESSICK

allem, wenn der Fluss nach starken Regenfällen hochstand. Mook fand einen Weg, das Meerwasser zu puffern, um die in der überdachten Brutanlage wachsenden Austern zu schützen – eine bemerkenswerte Innovation, die zwar sehr arbeitsintensiv ist, sich aber bei anderen Muschelzüchtern durchaus durchsetzen könnte, falls der Säuregehalt weiter steigt.

Mooks Austernzuchtanlage ist in zwei halbzyklindrischen Hütten aus Stahl untergebracht und ähnelt eher einem Labor als einer Farm. Im Frühjahr 2021 führte mich Meredith White, die Leiterin der Forschungs- und Entwicklungsabteilung des Unternehmens, in die Brutstation – einen feuchten, höhlenartigen Raum, in dem es nach Meer roch. White lernte Mook kennen, als sie als Wissenschaftlerin am Bigelow Laboratory for Ocean Sciences in East Boothbay, Maine, arbeitete, und weiß praktisch alles über Muscheln. Mooks Austern, erzählt sie, werden in Labors in Virginia und New Jersey auf bestimmte Merkmale hin gezüchtet – Größe, Form, Krankheitsresistenz – und als Zuchttiere zu Mook geschickt. Ob sie männlich oder weiblich sind, weiß man zu diesem Zeitpunkt noch nicht: »Man kann sie nicht unterscheiden, ohne sie zu öffnen, doch das würde sie töten«, erklärt die Biologin.

Die Arbeiter müssen abwarten, bis die Austern ihr Geschlecht von selbst preisgeben: Sowohl die Weibchen

als auch die Männchen klatschen vor dem Laichvorgang mit ihren Schalen, wobei die Weibchen eine Wolke von bis zu 20 Millionen Eiern und die Männchen einen Strom von Spermien abgeben. Techniker kombinieren Eier und Spermien anschließend sorgfältig in kleinen weißen Schalen, um die In-vitro-Befruchtung einzuleiten. Die entstandenen Embryonen werden in Tanks mit 3000 bis 6000 Litern Wasser überführt, das nach und nach erwärmt wird, um das Wachstum der Larven zu optimieren. »Wir kontrollieren sie jeden Tag unter dem Mikroskop«, erläutert White. »Wir können sehen, wie sich die Zellen teilen, und nach 24 Stunden haben sie eine Schale.«

Innerhalb von etwa zwei Wochen bilden die Austern einen pigmentierten Augenfleck aus (interessanterweise haben reife Austern am ganzen Körper Augen). Das ist ein Zeichen dafür, dass sie sich dem Stadium der Pediveligerie nähern, in dem ihnen eine Art Fuß wächst. White holt eine Reihe von Tablettts mit gemahlener Austernschalen hervor, auf denen winzige Austern ihren Fuß »setzen«: Mit einer Art natürlichem Klebstoff heften sie sich an die harte Oberfläche, genau so, wie sie es in der freien Natur würden. »Wir verkaufen 140 Millionen Saataustern pro Jahr«, sagt sie. Sie gehen an Züchter im ganzen Bundesstaat und wachsen schließlich zu reifen Austern heran. Auf den lokalen Märkten bringen die Meeresfrüchte etwa



DIE AUSTERN DER MOOK SEA FARM wachsen in Säcken heran. Diese sind mit Käfigen verstärkt und werden im Damariscotta-Fluss versenkt.

15 Dollar pro Dutzend ein, in Restaurants bezahlen die Gäste für die gleiche Menge rund 25 Dollar.

In Maine dauert die Saison für die Austernzucht nur fünf Monate, von April bis Oktober. Doch Mooks Erfolg beruht zum Teil darauf, dass er diese Zeitspanne verlängern kann, indem er die Austern in den kälteren Monaten in Innenräumen anbaut. Wie Katzen, Hunde und Hühner müssen auch Austern im Haus gefüttert werden. Mook hat dazu eigene Wachstums- und Verarbeitungstechniken für Algen entwickelt; die Details sind Firmengeheimnis. Er verrät nur ein paar Dinge: Die winzigen Organismen sind heterotroph, können also Energie aus Zucker gewinnen, und benötigen kein Licht, was die Stromkosten senkt. Die Geld sparende Innovation war ein Wendepunkt in seiner Zucht.

»Bills System ist genial und vollständig skalierbar«, sagt Jon Lewis und ergänzt: »Es ist das erste Mal, dass mit dieser Technologie Futter speziell für Muscheln hergestellt wird, und das könnte die Branche revolutionieren.« Der Herstellungsprozess muss peinlich genau eingehalten

werden. »Wir füttern die Algen mit Glukose und züchten sie in einem Reinraum unter Unterdruck, um Verunreinigungen zu vermeiden«, erklärt mir Mook, während ich einen Techniker beobachte, der sich wie ein Chirurg Haarnetz und Überziehschuhe anzieht, bevor er den makellosen Raum betritt. »Wir ernten die Zellen alle sieben Tage, schleudern sie mit einer speziellen Zentrifuge, bei der ihre Struktur erhalten bleibt, drücken das Wasser heraus und frieren die Paste in Portionen von Ein-Kilogramm-Blöcken ein«, erläutert Mook. Der Chef öffnet eine Gefriertruhe und entnimmt ihr einen verschlossenen Plastikbeutel mit gefrorenem grünem Schleim. »Wir haben zehn Jahre gebraucht, um das zu entwickeln«, sagt er und führt uns dann in den »Zuchtraum«, wo in verschiedenen Glasbehältern unterschiedliche Algensorten in Grün-, Gelb- und Orangetönen lagern.

Austern seien schwieriger zu züchten als Miesmuscheln, mit denen er auch experimentiert hat, sagt Mook. »Austern im Vergleich zu Miesmuscheln zu züchten ist wie Orchideen im Vergleich zu Tulpen zu züchten«, erklärt er mir. »Miesmuscheln bringen weniger Geld pro Pfund ein, aber hat man die Infrastruktur erst einmal aufgebaut, ist ihr Anbau viel billiger, weil das Saatgut im Gegensatz zu dem von Austern in der Natur vorkommt und kostenlos



PETER ESSICK

ist.« Townsend stimmt dem zu. »Miesmuscheln wachsen in sehr hoher Dichte, enthalten viel Eiweiß und sind eine gute Quelle für Omega-3-Fettsäuren und andere Nährstoffe«, sagt er. »Wenn wir die ganze Welt dazu bringen könnten, mehr davon zu essen, hätte die Menschheit weniger Probleme.«

Schutz vor Enten und Stürmen

Newell versucht seit Langem, diesen Traum zu verwirklichen. Vor Jahrzehnten, als er seine Arbeit aufnahm, gab es in Maine noch keine Muschelflöße. Stattdessen wurden die Meeresfrüchte an einer einzigen langen Leine gezüchtet, die sich von einer schwimmenden Boje zur nächsten zog. An vielen Orten ist die Methode billig, effizient und effektiv. Nicht aber in Maine: Denn dort wimmelt es von Enten, darunter drei Kilogramm schweren Eiderenten, die jeden Tag ihr eigenes Körpergewicht an Muscheln fressen. Das Entenproblem machte den Mächtgern-Muschelzüchtern in Maine jahrzehntelang einen Strich durch die Rechnung, bis Newell und ein paar weitere Enthusiasten von einer spanischen Methode erfuhren: Hier wurden Leinen von einem verankerten Floß aus ins Meer gelassen. Diese Konstruktion ließ sich mit Netzen gegen die Enten schützen. Sie bauten 35 Flöße

und installierten sie an verschiedenen Wasserstraßen im ganzen Bundesstaat. Um jedes Floß herum brachten sie ein Netz an, das bis 18 Meter tief unter die Wasseroberfläche reichte.

Damit war das Entenproblem gelöst. Doch schon bald stand man vor der nächsten Herausforderung: Die Flöße waren für ruhigere Gewässer gebaut, aber an der stürmischen Küste rissen Winde mit 110 bis 130 Kilometern pro Stunde die Ernte von den Leinen und zerstörten die Flöße.

Mit Hilfe staatlicher Zuschüsse entwickelte und patentierte Newell ein spezielles Floß, das selbst bei Sturm nur minimal in Mitleidenschaft gezogen wird. Der Trick: Die Konstruktion lässt sich drei bis dreieinhalb Meter tief unter die Wellen absenken. Das Floß, das an der Barkasse von Newells Pemaquid Mussel Farm befestigt ist, ist eine dieser bemerkenswerten Vorrichtungen, die den Muschel-anbau wesentlich praktikabler macht. Mit schwimmenden Flößen erntete Newell nach eigenen Angaben in jeder Saison knapp 70 Kilogramm Miesmuscheln pro Seil. »Mit Tauchflößen sind es durchweg 140 bis 180 Kilogramm. So ernten wir im Jahr gut 45 000 Kilogramm Muscheln auf jedem Floß«, rechnet er vor. Weil die Erfindung die Zucht ein gutes Stück rentabler macht, wird sie zu einer attraktiven Option für ehemalige Fischer.

Rosamond L. Naylor, Leiterin des Zentrums für Lebensmittelsicherheit und Umwelt in Stanford, glaubt, dass die so geernteten Schalentiere eine wichtige Rolle in einer gesunden Ernährung der Zukunft spielen könnten. »Muscheln sind eine unglaublich reichhaltige Eiweißquelle«, sagt sie und fügt hinzu, dass wir nur moderate Mengen davon auf unseren Tellern brauchen. US-Amerikaner beispielsweise konsumieren tendenziell zu viel Eiweiß und zu wenige lebenswichtige Mikronährstoffe. Von Letzteren enthalten Miesmuscheln große Mengen, etwa Zink, Eisen, Magnesium und Omega-3-Fettsäuren. Ob RAS-Tanks die Lösung sind, ist fraglich. Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik ist jedoch klar: Nachhaltige Zucht in Kombination mit anderen Tier- und Pflanzenarten wird wahrscheinlich der beste Ansatz für die Ernährung der Weltbevölkerung in den kommenden Jahren und Jahrzehnten sein. ◀

QUELLEN

An, D. et al.: Application of computer vision in fish intelligent feeding system – a review. *Aquaculture Research* 52, 2021

Cashion, T. et al.: Most fish destined for fishmeal production are food-grade fish. *Fish and Fisheries* 18, 2017

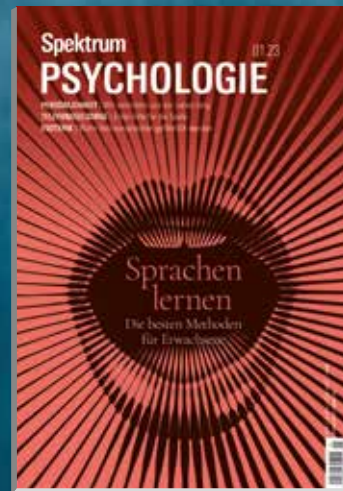
Cubitt, K. F. et al.: Social hierarchies, growth and brain serotonin metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar*) kept under commercial rearing conditions. *Physiology and Behaviour* 94, 2008

Gray, H. E. et al.: Organic phosphorus removal using an integrated advanced oxidation-ultrafiltration process. *Water Research* 182, 2020

Wringe, B. F. et al.: Extensive hybridization following a large escape of domesticated Atlantic salmon in the Northwest Atlantic. *Communications Biology* 1, 2018.

Unsere Neuerscheinungen

Ob Naturwissenschaften, Raumfahrt oder Psychologie:
Mit unseren Magazinen behalten Sie stets den Überblick
über den aktuellen Stand der Forschung



Informationen und eine Bestellmöglichkeit
zu diesen und weiteren Neuerscheinungen:
service@spektrum.de | Tel. 06221 9126-743
[Spektrum.de/aktion/neuerscheinungen](https://www.spektrum.de/aktion/neuerscheinungen)

Manipulativer Lebenszyklus

Wie ein Parasit das Verhalten von mindestens einem seiner drei Wirte steuert, um vom Wasser in die Luft zu gelangen – und wieder zurück.

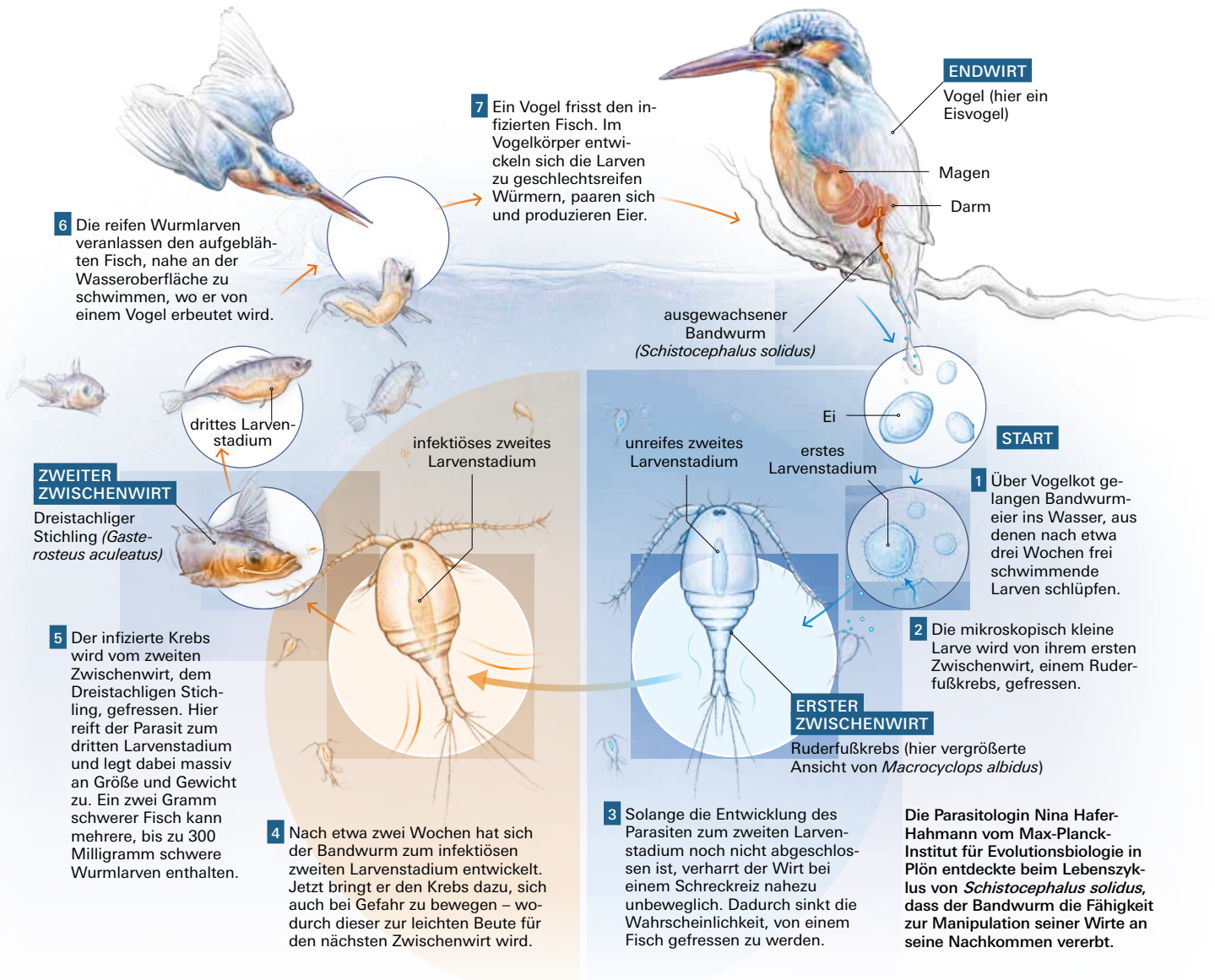
Text: Madhusree Mukerjee, Grafik: Daisy Chung

Manche Parasiten manipulieren ihre Opfer, um ihren Lebenszyklus abzuschließen. So entwickelt sich der Bandwurm *Schistocephalus solidus* in seinem Zwischenwirt, dem Dreistachligen Stichling (*Gasterosteus aculeatus*), zur infektiösen Larve, die von einem Vogel als Endwirt aufgenommen wird, wo er sich fortpflanzt. Doch die aus den Eiern schlüpfenden, nur wenige Millimeter großen Larven sind viel zu klein, um von Fischen gefressen zu werden.

Stattdessen lassen sich die Larven von einem winzigen Ruderfußkreb (Copepoda) verspeisen. Die auf Grund ihrer ruckartigen Bewegungen Hüpferlinge genannten Tiere verharren normalerweise bei Gefahr nahezu unbeweglich. Doch sobald die Bandwurmlarven im Krebskörper reif sind, unterbleibt dieser Schutzreflex – und der Krebs wird samt Parasit von einem Fisch geschluckt.

Im Fischkörper wächst die Larve enorm, so dass der Stichling an der Wasseroberfläche nach Luft schnappen muss, was ihn zu einem leichten Opfer für einen Vogel macht. In dessen Magen-Darm-Trakt reift der Schmarotzer heran, paart sich und produziert Eier, die über den Vogelkot zurück ins Wasser gelangen. So schließt sich der Kreis.

DAISY CHUNG / SCIENTIFIC AMERICAN OKTOBER 2022; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Maskierte Wirkstoffmoleküle

Um Medikamente zur Therapie von Erkrankungen gezielt im Organismus zur Wirkung zu bringen, greift die pharmazeutische Industrie mitunter tief in die biochemische Trickkiste. Überraschend prominente Arzneimittel funktionieren nach dem spannenden Prodrug-Konzept.

► spektrum.de/artikel/2085735



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

► Nicht jedes Medikament wirkt in unserem Körper in der Form, in der es in der Packung vorliegt. Oft überführen erst bestimmte Vorgänge im Organismus das Arzneimittel in einen aktiven Wirkstoff. Dann bezeichnet man es als »Prodrug«: als Vorläufer für das eigentliche Medikament.

Den Begriff prägte der australische Pharmazeut Adrian Albert (1907–1989): »Manchmal ist die verabreichte Substanz nur ein »Pro-drug«, das abgebaut werden muss, um das wahre Medikament zu ergeben«, schrieb er bereits im Jahr 1958. Stellte dieser Fall damals noch eher eine seltene Ausnahme dar, sind heutzutage schätzungsweise zehn Prozent aller Arzneimittel Prodrugs.

Wozu der Umstand? Manchmal besitzt der optimale Wirkstoff Eigenschaften, die ihn daran hindern, gewisse Schranken im Körper zu überwinden. Dann ist es vorteilhaft, seine Struktur vorübergehend zu ändern, bis er an seinem Ziel angekommen ist: So werden Stoffe etwa wasserlöslicher gemacht, wenn dies zur Injektion des Arzneimittels benötigt wird oder sich das Medikament im Magen-Darm-Trakt zu langsam auflöst (physikochemische Eigenschaften). Dank anderer Modifikationen kann eine Substanz wiederum die Blut-Hirn-Schranke besser über-

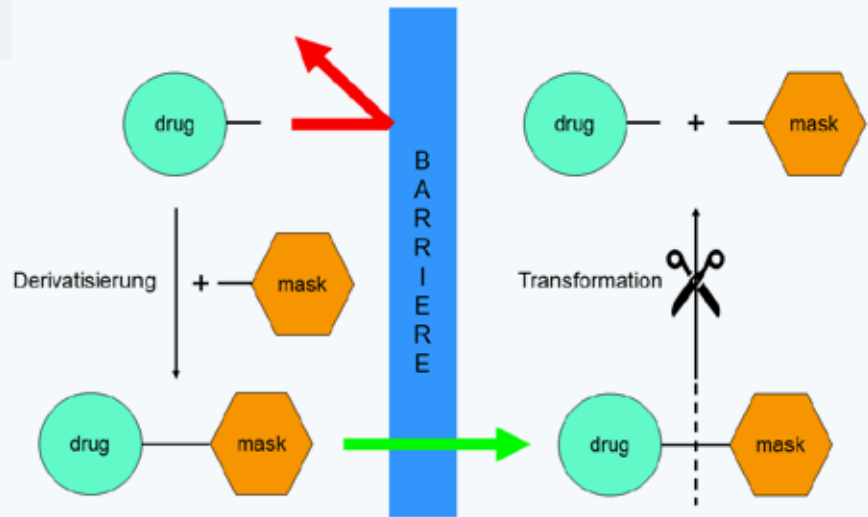
winden. Nebenwirkungen wie lokale Reizung oder Giftigkeit (biopharmazeutische Eigenschaften) lassen sich durch die Modifikation des Moleküls ebenfalls vermeiden. Auch Resorption, Bioverfügbarkeit, Verteilung, Metabolismus und Ausscheidung des Arzneimittels (pharmakokinetische Eigenschaften) variiert man auf diese Weise gezielt, ohne beim Wirkstoff Abstriche machen zu müssen.

Bei den meisten Prodrugs liegt der eigentliche Wirkstoff »derivatisiert« vor: Man verknüpft das pharmakologisch wirksame Molekül (drug) bei der Herstellung chemisch mit einem Strukturelement (mask). Das verändert die Eigenschaften des Arzneimittels gezielt, so dass es die Hürde überwinden kann. Danach wird das Wirkstoffmolekül durch ein Stoffwechselereignis oder eine Änderung der chemischen Umgebung wieder freigesetzt (siehe »Prodrug-Konzept«).

Eines der ersten Medikamente, das man zu den Prodrugs zählen kann, ist jedem ein Begriff: Acetylsalicylsäure, bekannt unter dem Markennamen Aspirin oder dem Kürzel ASS. Die vorsichtige Formulierung soll deutlich machen, dass die Einordnung auf Grund der Eigenwirkungen der Acetylsalicylsäure nicht unumstritten ist und letztlich von der Indikation abhängt. Acetylsalicylsäure ist ein chemischer Abkömmling der Salicylsäure. Letztere wirkt schmerz- und entzündungshemmend, ist jedoch wenig bekömmlich, da sie den Magen-Darm-Trakt stark reizt. Daneben treten Schweißausbrüche, Hitzewallungen und Ohrensausen auf – Symptome, die man früher als »Salicylrausch« bezeichnete. Acetylsalicylsäure hingegen ist gut verträglich. Im Jahr 1853 gelang es dem französischen Chemielehrer Charles Frédéric Gerhardt erstmals, sie im Labor herzustellen. Er verzichtete allerdings auf die Reinigung der erhaltenen Substanz sowie auf deren Strukturaufklärung. Ohne Nebenprodukte stellte sie ab 1897 die Firma Bayer aus Essigsäureanhydrid (Acetanhydrid) und Salicylsäure her. Dabei läuft eine klassische Veresterung ab.

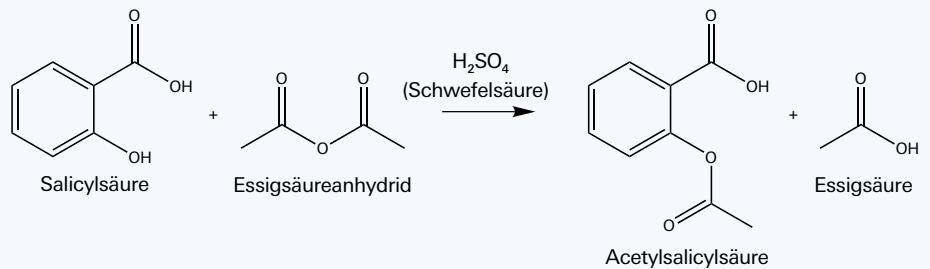
Prodrug-Konzept

Bei der Derivatisierung heftet man den Wirkstoff an einen Zusatz (»mask«), der ihm hilft, gewisse Barrieren im Körper zu überwinden. Am Zielort wird der Wirkstoff durch körpereigene Enzyme oder die chemische Umgebung freigesetzt (Transformation).

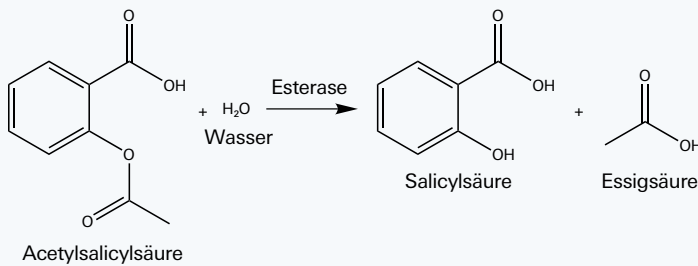


MATTHIAS DUCCI

Ein prominentes Beispiel dafür ist das bekannte Medikament Acetylsalicylsäure (ASS). Man erhält es aus Salicylsäure und Essigsäureanhydrid (Derivatisierung).



MATTHIAS DUCCI



Im Magen spalten Enzyme, so genannte Esterasen, ASS wieder in Salicylsäure und Essigsäure auf (Transformation).

Die Spaltung lässt sich im Labor beobachten: Beim Erwärmen eines alkalischen Gemisches aus ASS, Phenolphthalein und Natronlauge (pink, links) sinkt der pH-Wert, da die Hydroxid-Ionen bei der Ester-spaltung verbraucht werden. Die Lösung entfärbt sich (rechts).

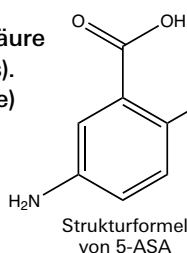


MATTHIAS DUCCI



MATTHIAS DUCCI

VERRÄTERISCHES LEUCHTEN Unter UV-Licht (Wellenlänge 365 nm) fluoresziert eine neutrale wässrige Lösung von 5-Aminosalicylsäure (5-ASA) mintgrün (oben links). Die saure Lösung (oben Mitte) leuchtet nicht, doch beim Hinzutropfen von Lauge zeigen sich eindrucksvolle Schlieren (oben rechts).

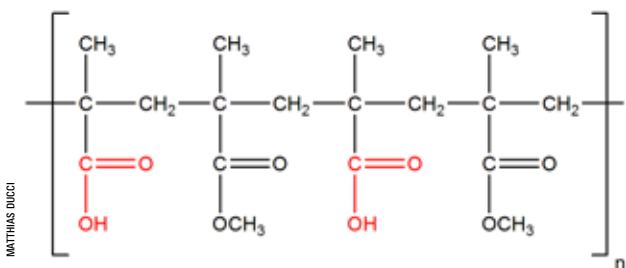


MATTHIAS DUCCI

Im Organismus spalten spezielle Enzyme, die Esterasen, ASS wieder hydrolytisch in Salicylsäure und Essigsäure auf.

Dieser Prozess lässt sich mit einem einfachen Versuchsaufbau nachstellen. Dazu gibt man 0,02 Gramm Acetylsalicylsäure in ein Reagenzglas und löst sie unter Erwärmen mit einem Bunsenbrenner in 2 Milliliter Leitungswasser. Anschließend gibt man ein bis zwei Tropfen einer 1-prozentigen ethanologischen Phenolphthalein-Lösung hinzu. Phenolphthalein ist ein Indikator, der in saurer sowie neutraler Lösung farblos ist und eine alkalische Lösung rosa-violett färbt. In die farblose Lösung wird Natronlauge (Konzentration: 0,1 mol/l) getropft. Die dabei auftretenden pinkfarbenen Schlieren entfärben sich sofort, wenn man das Reagenzglas schüttelt. Denn auf jedes durch die Natronlauge hinzugefügte Hydroxid-Ion (OH^- -Ion) überträgt die im ASS-Molekül gebundene Carboxygruppe (COOH -Gruppe) ein Wasserstoff-Ion

SÄURESCHUTZ Ausschnitt aus der Struktur von Eudragit L, einem säurebeständigen Medikamentenüberzug (rot: freie Carboxygruppen).



MATTHIAS DUCCI

(H^+ -Ion). Dabei entstehen Wassermoleküle (Neutralisation), während aus der Carboxygruppe eine negativ geladene Carboxylatgruppe (COO^- -Gruppe) wird. Deshalb bleibt die Lösung zunächst farblos.

Fügt man allerdings mehr als die zur Neutralisation notwendigen Hydroxid-Ionen hinzu (hier: mehr als etwa 1,1 Milliliter Natronlauge), färbt sich die nun alkalische Lösung pink. Die Farbe verschwindet jedoch wieder, wenn man die Lösung erwärmt (siehe »Prodrug-Konzept«). Bei den höheren Temperaturen beginnt sich nämlich die Esterbindung zu spalten, was Hydroxid-Ionen verbraucht (Verseifung).

Vielfältige Anwendungen

In diesem Zusammenhang ist interessant, dass die Menschen bereits in der Antike Weidenrinde (Cortex salicis) als Medizinprodukt einsetzten. Sie enthält Salicin, eine Verbindung des Salicylalkohols mit einem Zucker. Nimmt man ein Extrakt aus Weidenrinde ein, wird der Salicylalkohol im Darm unter Abspaltung des Zuckers freigesetzt. Über die Blutbahn gelangt er in die Leber und wird dort zum eigentlichen Wirkstoff Salicylsäure oxidiert. So gesehen ist Weidenrindenextrakt ein natürliches Prodrug!

Die Veresterung des eigentlichen Arzneistoffs ist als Prodrug-Konzept weit verbreitet. Sie wird auch bei Aciclovir angewandt, einem Mittel gegen das Herpesvirus. Der Wirkstoff wird mit der Aminosäure Valin zum Prodrug Valaciclovir verestert. Dieses ist lipophiler (fettlöslicher) und kann dadurch besser über die Darmschleimhaut aufgenommen werden. Derartige Verbindungen bezeichnet man als Resorptionsester. Manch ein Wirkstoff ist sogar doppelt verestert, etwa Candestartancilexetil, das zu Candestartan metabolisiert wird. Das Medikament wird unter anderem zur Therapie von Bluthochdruck und Herzinsuffizienz eingesetzt.

Eine andere pharmakologisch wirksame Substanz, die der Salicylsäure strukturell stark ähnelt, ist 5-Aminosalicylsäure (5-ASA). Sie trägt an einem Kohlenstoffatom des Benzolrings zusätzlich eine Aminogruppe (NH_2 -Gruppe, siehe »Verräterisches Leuchten«).

Eine wässrige Lösung von 5-ASA fluoresziert unter UV-Licht mintgrün. Nach Zugabe von Säure verschwindet das Leuchten und tritt erst wieder auf, wenn man Lauge hinzufügt. Optisch eindrucksvoll ist es, wenn man die

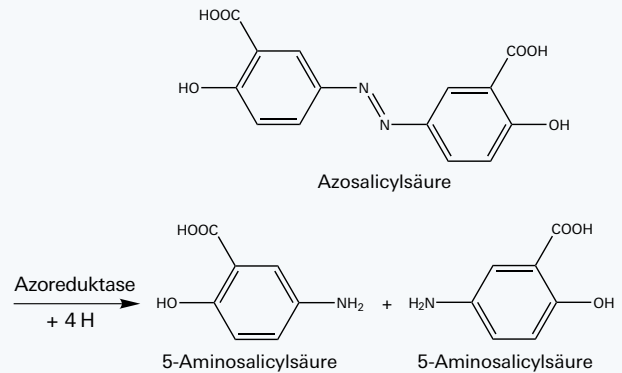
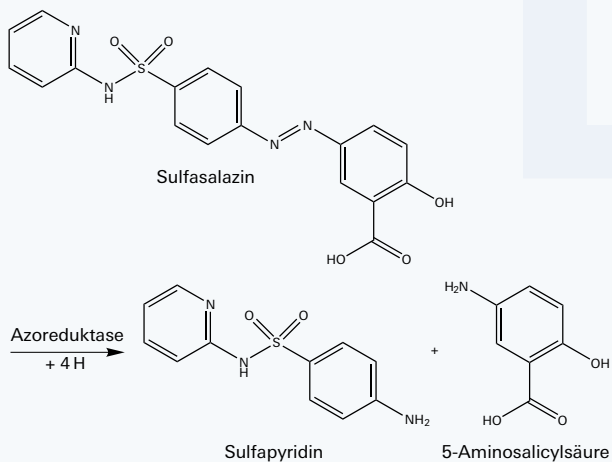
Lauge langsam hinzutropft, ohne die Lösung zu bewegen: Dann bilden sich fluoreszierende Schlieren. Das Phänomen entsteht, weil 5-ASA in wässriger Lösung drei verschiedene Formen ausbilden kann, die unterschiedliche Fluoreszenzeigenschaften besitzen und in einem pH-abhängigen Protolysegleichgewicht miteinander stehen.

Seit Anfang der 1940er Jahre ist bekannt, dass 5-ASA entzündungshemmend wirkt. Daher wird sie unter anderem bei entzündlichen Darmerkrankungen verschrieben, beispielsweise Colitis ulcerosa (kurz CED für »chronisch-entzündliche Darmerkrankung«) und Morbus Crohn. CED betrifft insbesondere den Dickdarm (Kolon), Morbus Crohn häufig den oberen Dickdarm und den unteren Dünndarm (Ileum). Der Handelsname des Medikaments lautet Mesalazin. Laut den Verpa-

ckungsbeschriftungen und Packungsbeilagen von Mesalazinpräparaten, etwa Salofalk 500 mg, sind die Tabletten magensaftresistent. Das ist durchaus sinnvoll, damit der Wirkstoff nicht frühzeitig aufgenommen und anschließend umgesetzt wird. Im Fall von Mesalazin ist der Hauptmetabolit die pharmakologisch inaktive N-Acetyl-5-aminosalicylsäure.

Der Magensaft ist mit einem pH-Wert von $1,1 \pm 0,2$ (im nüchternen Zustand) sehr niedrig, also stark sauer. Dagegen sind die pH-Werte im Dünndarm mit 6 bis 8 sowie im Dickdarm mit $6,4 \pm 0,6$ vergleichsweise hoch. Es liegt also nahe zu vermuten, dass ein säurebeständiger Überzug für

Zwei auf einen Streich



1

Bei der reduktiven Spaltung von Sulfasalazin entstehen das antibiotisch wirksame Sulfapyridin und der entzündungshemmende Wirkstoff 5-ASA.

2

Bakterielle Azoreduktasen im Darm spalten Azosalicylsäure reaktiv und setzen gleich zwei 5-ASA-Moleküle frei.

3

Reduktive Spaltung im Labor: Wässrige Olsalazin-Lösung (links), die Lösung nach Zugabe des Reduktionsmittels Natriumdithionit und Erhitzen (Mitte), mittlere Lösung unter UV-Licht (Wellenlänge 365 nm) nach Zugabe von Soda (rechts). Die mintgrüne Fluoreszenz zeigt an, dass 5-ASA vorliegt.



MATTHIAS DUCCI

die Magensaftresistenz verantwortlich ist. Dieser muss sich zudem bei höheren pH-Werten auflösen, damit 5-ASA im Darm wirken kann. In der Packungsbeilage von Salofalk 500 mg findet man den Inhaltsstoff Eudragit L. Hinter der Bezeichnung Eudragit verbergen sich eine Reihe von Stoffen, mit denen Tabletten überzogen werden. Das ermöglicht es, Wirkstoffe pH-abhängig gezielt freizusetzen. Chemisch handelt es sich um saure Polymethacrylate. So ist Eudragit L ein anionisches Copolymer aus Methacrylsäure (2-Methylpropensäure) und Methacrylat (dem Methacrylsäure-Methylester) im Säure-Ester-Verhältnis von 1 : 1 (siehe »Säureschutz«).

Löslichkeit gezielt einstellen

Im sauren Milieu des Magens liegen die freien Carboxygruppen des Polymers (in der Grafik rot hervorgehoben) als COOH vor. In dieser Form löst sich nur wenig Eudragit L im wässrigen Milieu. Steigt der pH-Wert an (im Dünn- oder Dickdarm), werden die Carboxygruppen zunehmend deprotoniert, sie spalten also H⁺-Ionen ab und bilden Carboxylatgruppen (COO⁻). Infolgedessen erhöht sich die Wasserlöslichkeit, da die negativ geladenen Carboxylatgruppen und die polaren Wassermoleküle stark miteinander wechselwirken. Eudragit L ist dadurch bei pH-Werten über 6 löslich. Dieser Mechanismus ist für die meisten Eudragit-Typen gleich. Ändert man das oben beschriebene Säure-Ester-Verhältnis nach 1 : 2 (Eudragit S), löst sich das Copolymer erst oberhalb von pH 7, da der Anteil an Carboxygruppen kleiner ist.

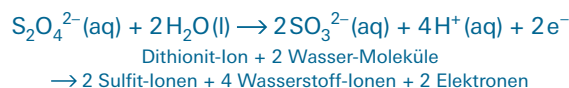
5-ASA lässt sich aber auch noch auf andere Weise gezielt im Darm zur Wirkung bringen. Erste Studien hierzu reichen in die 1940er Jahre zurück. Die schwedische Ärztin Nanna Svartz (1890–1986), erste Professorin an einer öffentlichen Universität in Schweden, experimentierte seinerzeit mit einem neuartigen Medikament. Die Expertin für Magen-Darm-Erkrankungen und Rheumatologie behandelte ihre Patienten mit dem Sulfonamidpräparat Sulfasalazin. Der Stoff selbst ist relativ wirkungslos. Allerdings spalten ihn bakterielle Azoreduktasen im Dickdarm an der Azogruppe (N=N-Gruppe) und setzen dabei die eigentlichen Wirkstoffe frei: 5-ASA sowie Sulfapyridin (siehe »Zwei auf einen Streich«).

Damit verfolgte Svartz sogar zwei Therapieansätze gleichzeitig: zum einen mit dem antibiotisch wirkenden Sulfapyridin und zum anderen mit der entzündungshemmenden 5-ASA. Denn hier ist das zusätzliche Strukturelement ebenfalls pharmakologisch wirksam! Diese besondere Prodrug-Strategie bezeichnet man als Codrug-Konzept. Bis heute behandelt man entzündliche Darmkrankungen damit. Das freigesetzte Sulfapyridin hat jedoch zahlreiche Nebenwirkungen: Manche sind vergleichsweise harmlos wie Kopfschmerzen, Appetitlosigkeit und Erbrechen. Weil es aber auch zu schweren Komplikationen wie Leber- oder Nierenschäden kommen kann, wurden alternative Wirkstoffe entwickelt und erprobt, die 5-ASA freisetzen können. So meldete die schwedische Firma Pharmacia in den Jahren 1981 und 1985 Azosalicylsäure unter dem Namen Dipentum (weite-

rer Handelsname: Olsalazin) zum Patent an. Azosalicylsäure enthält wie Sulfasalazin eine Azogruppe und kann demnach ebenfalls von bakteriellen Azoreduktasen im Darm gespalten werden. Dabei werden jedoch ausschließlich zwei 5-ASA-Moleküle freigesetzt!

Der Vorgang lässt sich mit einem chemischen Reduktionsmittel nachvollziehen. Dazu löst man wenige Kristalle Olsalazin in einem Reagenzglas in 2 Milliliter Leitungswasser. Anschließend gibt man zirka 0,01 Gramm Natriumdithionit (Na₂S₂O₄) hinzu und erhitzt das Gemisch mit dem Bunsenbrenner. Nach 10 bis 20 Sekunden entfärbt sich die ursprünglich gelbe Lösung. Man erkennt je nach pH-Wert des Leitungswassers entweder keine oder nur eine schwache grüne Fluoreszenz. Wird eine Spatelspitze Soda (Natriumcarbonat, Na₂CO₃) hinzugefügt, zeigt sich die typische mintgrüne Fluoreszenz von 5-ASA (»Zwei auf einen Streich«).

Natriumdithionit ist ein starkes Reduktionsmittel und spaltet Olsalazin an der Azogruppe genau wie die bakteriellen Azoreduktasen im Darm in zwei 5-ASA-Moleküle. Dabei werden die Dithionit-Ionen zu Sulfit-Ionen oxidiert. Diese Teilreaktion lässt sich folgendermaßen formulieren (»aq« steht für »in Wasser gelöst«, »l« für »flüssig«):



Die Historie der Azosalicylsäure ist übrigens spannend: Als Erster schaffte es 1913 der Chemiker Carl Schnittler von der Basler Firma J. R. Geigy, das Molekül herzustellen. Die Synthese erwuchs aus einer Notlage: Bei einem anderen chemischen Prozess fielen als Nebenprodukt große Mengen 2-Chlorbenzoesäure an. Darum bekamen die Chemiker von Geigy den Auftrag, das Abfallprodukt zu verwerten. Als sich zirka 30000 Kilogramm 2-Chlorbenzoesäure angesammelt hatten, gelang endlich der Durchbruch. Schnittler erhielt Azosalicylsäure – einen intensiv gelben Farbstoff! Er bekam die Bezeichnung Eriochromflavin A (lateinisch flavus: gelb) und zählt zur Gruppe der Eriochromfarbstoffe. Sie dienen zum Färben von Wolle und sind sehr licht-, wasch- und schweißecht. Bis das pharmakologische Potenzial der Azosalicylsäure erkannt wurde, dauert es fast 70 Jahre. ◀

QUELLEN

Albert, A.: Chemical aspects of selective toxicity. Nature 182, 1958

Fabian, J. et al.: Arzneistoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaften. Pharmazeutische Zeitung 26, 2011

Felmeier, H.: Lebenswichtiges Getümmel im Darm. Pharmazeutische Zeitung 2012, 47

WEBLINK

Ducci, M.: Azoverbindungen im pharmazeutischen Kontext. <https://doi.org/10.1002/ckon.202000084>

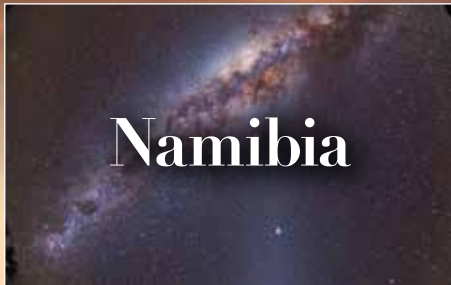
Unterrichtskonzept, Experimente und Modelle für die Prodrug-Thematik im Chemieunterricht

Spektrum der Wissenschaft bietet seinen Lesern

2023 drei besondere Foto-Reisen

Leserreisen

ZWEITE JAHRESHÄLFTE 2023



Namibia

DIE SÜDHEMISPHÄRE FOTOGRAFIEREN

Bei dieser Reise erwartet uns ein umfangreiches astrofotografisches Programm. Stefan Seip wird sowohl bei der Planung, bei der Durchführung der nächtlichen Beobachtungen, der Bildbearbeitung und bei der Urlaubsfotografie die Reiseteilnehmer betreuen.

Die Reise ist für Laien als auch für Fortgeschrittene geeignet. Auf dem Programm stehen Workshops und Vorträge zum Thema Fotografie von Planeten, des Sternenhimmels mit Landschaft, Strichspuraufnahmen, eine Sternbildführung am Südhimmel, Deep-Sky-Aufnahmen sowie Bildbearbeitungstechniken. Fotoausflüge tagsüber in die reizvolle Umgebung dürfen natürlich nicht fehlen. Neben dem Milchstraßenzentrum können wir die beiden Magellanschen Wolken und viele berühmte Himmelsobjekte bewundern. Eine Besichtigung des H.E.S.S.-Projekts mit dem weltgrößten Tscherenkow-Teleskop rundet das astronomische Programm ab.

Reisedatum: 15.–29. 7. 2023, 15-tägig
Preis DZ/HP € 3.950,–
Thematische Betreuung: Stefan Seip



Island

HERBSTFARBEN IN ISLAND

Bei dieser Leserreise erleben wir wildschroffe Naturschönheiten und besondere atmosphärische Phänomene der Insel im Rahmen eines interessanten Fotoseminars mit dem Buchautor Stefan Seip. Mit ihm haben wir als erfahrenem Seminarleiter einen der führenden Astrofotografen Deutschlands dabei, der zudem in den Bereichen Naturfotografie, Porträt und Schwarz-Weiß-Fotos außerordentlich versiert ist. Wer die zarten, geisterhaften Schleier des Polarlichts erfolgreich fotografieren möchte, braucht einen wirklich dunklen Standort abseits künstlicher Lichtverschmutzung. Einen solchen Standort haben wir am Myvatn im Nordosten Islands gefunden, von wo aus wir an 6 Tagen der insgesamt 10-tägigen Reise unsere Touren unternehmen. Die Geografie und Geologie dieser Insel mit den bedeutendsten Vulkanlandschaften der Erde sind weitere spannende Themen. Die Reise findet mit deutscher Reiseleitung statt.

Reisedatum: 18.–27. 9. 2023, 10-tägig
Preis DZ/F: € 4.380,–
Thematische Betreuung: Stefan Seip



Chile

DIE WELTGRÖSSTEN OBSERVATORIEN

Das faszinierende Land der großen Observatorien lockt im Dezember wieder in die Wüste Atacama und die Welt der hohen Anden. Unter fachkundiger Betreuung sind die astronomischen Highlights der Besuch des weltbekannten Großobservatoriums La Silla und des nahe gelegenen Observatoriums auf dem Cerro Paranal mit seinen berühmten 8,2-Meter-VLT-Teleskopen und der Interferometrieanlage. Auch eine Sonderführung zu der Montagestation des ALMA-Projektes ist geplant. Landschaftlich stehen vor allem die Atacamawüste und die fantastische Welt der hohen Anden auf dem Programm: San Pedro de Atacama, die große Salzkordillere, der viertgrößte Salzsee der Welt, die Hochlandlagunen des Altiplano und die Geysire des Vulkans El Tatio. Beobachtungen und Astrofotografie des eindrucksvollen Himmels der südlichen Hemisphäre dürfen bei dieser Reise mit Stefan Seip natürlich nicht fehlen.

Reisedatum: 4.–18. 12. 2023, 15-tägig
Preis im DZ/HP: € 7.980,–
Thematische Betreuung: Stefan Seip

Infopakete bei unserem Reiseveranstalter:

WITTMANN TRAVEL, 21129 Hamburg, Urenfleet 6e, Tel.: 040 85105-376, Fax: 040 85105-377, E-Mail: info@wittmann-travel.de
www.wittmann-travel.de

Der dunkle Kern der Milchstraße

2022 gab es die erste Fotografie von der unmittelbaren Umgebung des supermassereichen Schwarzen Lochs in unserer Galaxis – ein Auftakt für weitere Beobachtungen dieser Art. Sie werden helfen, die extremen Objekte besser zu verstehen.

» [spektrum.de/artikel/2085738](https://www.spektrum.de/artikel/2085738)



Seth Fletcher ist Redakteur bei »Scientific American«. 2018 hat er ein Buch über das Event Horizon Telescope veröffentlicht (»Einstein's Shadow«).

Im Herzen der Milchstraße schleudern Sterne mit mehreren Prozent der Lichtgeschwindigkeit um den scheinbar leeren Raum herum. Schon seit Jahrzehnten gibt es die Hypothese, nur ein supermassereiches Schwarzes Loch mit seiner konzentrierten Schwerkraft könne die extremen Beschleunigungen verursachen. Doch bis zum Jahr 2022 waren viele Formulierungen bemerkenswert zurückhaltend, da es nur indirekte Beweise gab. Als beispielsweise 2020 der US-Astronomin Andrea Ghez und ihrem deutschen Kollegen Reinhard Genzel eine Hälfte des Nobelpreises für Physik zuerkannt wurde, hieß es in der Begründung zur Entscheidung noch recht reserviert, sie hätten ein »supermassereiches kompaktes Objekt im Zentrum unserer Galaxie« entdeckt.

Im Mai 2022 hat das Team eines internationalen Großprojekts namens Event Horizon Telescope (EHT) jedoch Klarheit über den Charakter von »Sagittarius A*« geschaffen. Es hat das erste direkte Foto von der unmittelbaren Umgebung des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße enthüllt. Das war zwar nicht das erste Bild dieser Art, denn bereits im April 2019 hatte die Forschungsgruppe einen ähnlichen Schnappschuss für den Fall des Exemplars in der 55 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie Messier 87 (M87) veröffentlicht (siehe »Spektrum« Juli 2019, S. 42). Aber Sagittarius A* ist etwas Besonderes, denn es handelt sich gewissermaßen um unser eigenes supermassereiches Schwarzes Loch. Es ist der Punkt, um den das Sonnensystem und alles andere in unserer Galaxis kreist.

Schwarze Löcher heißen so, weil nichts mehr entkommt, was in sie hineingefallen ist, einschließlich Licht. Daher sind sie eigentlich unsichtbar. Aber sie verzerren die Raumzeit um sich herum so enorm, dass sie einen charakteristischen Schatten werfen, wenn sich Materie beim Hineinstürzen aufheizt und hinter dem Schwarzen

Loch intensiv aufglüht. Diese Struktur ist etwa zweieinhalbmal so groß wie der Ereignishorizont – die endgültige Grenze, ab der nichts jemals wieder zurückkehrt.

Das EHT hat den Schatten mit einer Technik namens Very Long Baseline Interferometry (VLBI) aufgenommen. Dabei werden Radioteleskope auf verschiedenen Kontinenten zu einem virtuellen Observatorium von der Größe der Erde zusammengeschaltet. Die eigentliche Messung fand bereits im April 2017 statt. Es dauerte aber Jahre, die Rohdaten zu analysieren und sie in ein Bild umzurechnen.

Die Verzögerung lag zum Teil an den globalen Verwerfungen durch die Coronapandemie. Die größere Herausforderung war jedoch, dass sich Sagittarius A* ständig verändert. Das 2017 ebenfalls anvisierte Schwarze Loch in M87 ist deutlich größer, und Materie in dessen Nähe braucht viele Stunden für einen vollständigen Umlauf. Deswegen kann man es lange Zeit in der gleichen Gestalt beobachten. Sagittarius A* hingegen besitzt rund 1000-mal weniger Masse. Sein Erscheinungsbild wechselt innerhalb von Minuten, da sich Gas in engeren Bahnen um es herum bewegt.

Zur Ruhe gekommen und unter Schleiern verborgen

Die wechselhafte Natur von Sagittarius A* macht das Objekt zu einem idealen Prüfstand für das Verständnis von Schwarzen Löchern und Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Jahrzehntelange Untersuchungen mit allerlei anderen Teleskopen hatten bereits grundlegende Informationen geliefert: genaue Daten zu seiner Masse, seinem Durchmesser und seiner Entfernung von der Erde. Nun entstand endlich die Möglichkeit, die unmittelbar drumherum aufflackernden Ströme in Echtzeit zu dokumentieren.

Schon in den frühen 1960er Jahren gab es Vermutungen, im Herzen der Milchstraße könnte ein Schwarzes Loch lauern. Zu der Zeit wusste man bereits von aktiven Galaxienkernen. Das sind extrem helle Zentralregionen, die von supermassereichen Schwarzen Löchern befeuert werden. Aus unserer irdischen Perspektive sind aktive Galaxienkerne eine Sache der Vergangenheit – wir sehen sie nur in weit entfernten Abschnitten des Universums. Was ist inzwischen aus ihnen geworden? 1969 vermutete der britische Astrophysiker Donald Lynden-Bell, die Quellen der Strahlung seien keineswegs verschwunden, sondern hätten sich lediglich zur Ruhe gesetzt. Demnach schlummern supermassereiche Schwarze Löcher in den Herzen fast aller Spiralgalaxien, einschließlich unserer eigenen.

1974 richteten die US-Astronomen Bruce Balick und Robert Brown Radioteleskope auf das Zentrum der Milchstraße im Sternbild Sagittarius und entdeckten etwas, von dem sie annahmen, dass es sich um das zentrale Schwarze Loch der Galaxis handelt. Sie vermuteten, dass die von ihnen gefundene Strahlungsquelle Wasserstoffwolken in der Umgebung zum Leuchten anregte. Brown griff deswegen auf die Nomenklatur der Atomphysik zurück, in der angeregte Zustände mit einem Sternchen gekenn-

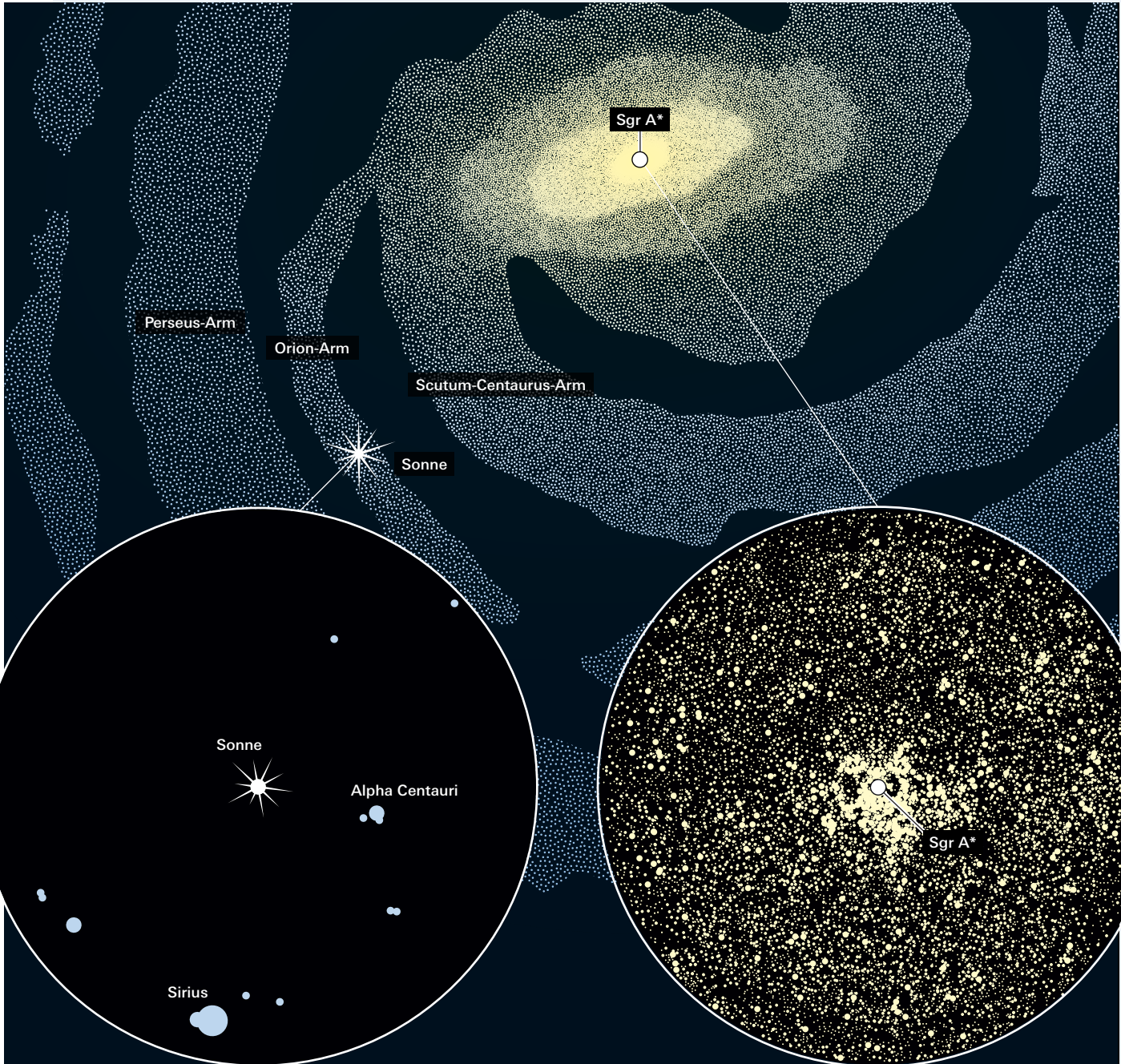
AUF EINEN BLICK

Gigant im Zentrum

- 1 Im Lauf der letzten Jahrzehnte haben immer mehr Beobachtungen darauf hingedeutet, dass sich inmitten unserer Galaxie ein Schwarzes Loch mit mehreren Millionen Sonnenmassen befindet.
- 2 Das erste direkte Foto wurde 2022 veröffentlicht. Für die Aufnahme war es nötig, weltweit verteilte Radioteleskope aufwändig zu einem erdgroßen, virtuellen Observatorium zu verbinden.
- 3 Zukünftige Untersuchungen sollen tiefere Einblicke in die dynamischen Vorgänge geben, die sich in der Materie rund um den Ereignishorizont abspielen.

Unser Schwarzes Loch

Das supermassereiche Exemplar inmitten der Milchstraße heißt Sagittarius A* (Sgr A*), ist rund 27000 Lichtjahre von uns entfernt und liegt in einer chaotischen, mit Sternen vollgepackten Region. Seine Größe entspricht etwa der Umlaufbahn von Merkur um die Sonne.



Solare Nachbarschaft

Das Sonnensystem befindet sich in einem Arm des Milchstraßensystems, der relativ weit von dessen Kernzone entfernt liegt. In unserer lokalen Umgebung liegen im Umkreis von zehn Lichtjahren lediglich 14 bekannte Sterne.

Galaktisches Zentrum

Im Kern der Milchstraße versammeln sich unvorstellbar viele Sterne. In diesem Ausschnitt ist bloß ein Prozent von ihnen dargestellt. Rund um Sagittarius A* kreisen Millionen Sterne in einem Abstand von weniger als zehn Lichtjahren.

KARLE PEER, MILCHSTRASSE MACH BOB BENJAMIN, UNIVERSITY OF WISCONSIN-WHITEWATER / SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2022, DT. BEARBEITUNG, SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

zeichnet werden, und nannte das neu entdeckte Objekt Sagittarius A*.

In den folgenden zwei Jahrzehnten gelangen nach und nach bessere Beobachtungen der Region. Dennoch stand einem genaueren Blick neben technologischen Problemen lange Zeit vor allem eine physikalische Tatsache im Weg: Es ist enorm schwierig, in das von Sternen, Gas und Staub überfüllte Zentrum der Milchstraße zu schauen (siehe »Unser Schwarzes Loch«).

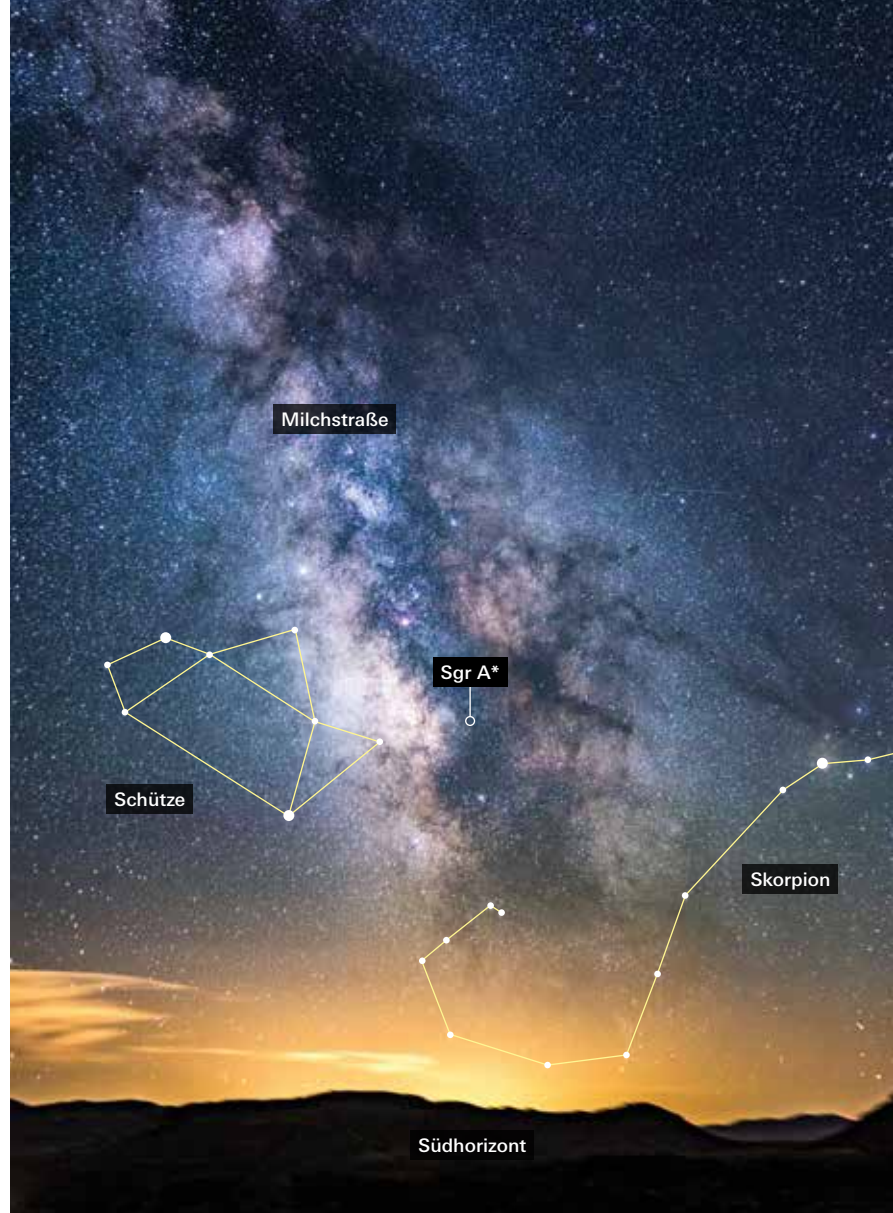
Sagittarius A* ist gleich in mehrerlei Hinsicht verschleiert. Das erste Hindernis besteht in der galaktischen Scheibe selbst und all dem Strahlung schluckenden Material, das auf der 27 000 Lichtjahre langen Strecke zwischen dem Schwarzen Loch und uns liegt. Radiowellen könnten diese erste Barriere grundsätzlich relativ unbeeinträchtigt durchqueren, werden aber von einer zweiten Art von Störfaktor aus der Bahn geworfen: Turbulenzen und Dichteschwankungen im elektrisch geladenen Plasma zwischen den Sternen lenken die Strahlung ab.

Vorstöße mit neuer Technik

Die letzte Schicht, die Sagittarius A* verdeckt, ist die Materie unmittelbar um das Schwarze Loch. Hier ist es ein wenig so, als würde man durch die Häute einer Zwiebel schauen. Die äußeren Materielagen emittieren größere Wellenlängen. Auf diesen Frequenzbereichen basieren die ersten Anwendungen von VLBI. Die gleiche Art von Interferometrie ist auch mit kürzerwelligem Licht möglich. Das lässt einen Blick auf die Schichten erhaschen, die näher am Ereignishorizont des Schwarzen Lochs liegen. Der Ansatz war die Grundlage für die technisch anspruchsvollen Pläne des EHT-Teams.

Dafür, dass es sich bei Sagittarius A* tatsächlich um ein supermassereiches Schwarzes Loch handelt, sammelten sich seit den 1970er Jahren immer mehr indirekte Beweise. Seinerzeit fand der Physiker Charles Townes von der University of California in Berkeley gemeinsam mit Kollegen heraus: Wolken von Gas bewegen sich im galaktischen Zentrum in einer Weise, die nur dann verständlich ist, wenn sie unter dem gravitativen Einfluss einer konzentrierten und zugleich unsichtbaren Masse stehen, die mehreren Millionen Sonnen entspricht. In den 1990er Jahren verfolgten Ghez und Genzel unabhängig voneinander die Bahnen von Sternen und kartierten deren Bewegung um einen unsichtbaren Punkt – mit derselben Schlussfolgerung.

Unterdessen verbesserte sich die Situation für die Radioastronomie. In den späten 1990er und frühen 2000er Jahren wurde eine neue Generation von Radioteleskopen für kürzere Wellenlängen entwickelt. Die gleichzeitig abgelaufene Revolution in der Computertechnik hat die



Datenmenge enorm erhöht, die ein Observatorium aufzeichnen und verarbeiten kann. Beides zusammen ließ endlich das Vorhaben aussichtsreich erscheinen, mit einem Netzwerk von Radioteleskopen mittels VLBI die Strahlung vom Rand des Schwarzen Lochs aufzuzeichnen. Ein erster Vorstoß fand 2007 mit einem Trio von Teleskopen in Hawaii, Kalifornien und Arizona statt. Sie durchdrangen den Schleier um Sagittarius A* und produzierten zwar noch kein Bild, aber fingen immerhin ein Signal auf.

1973 berechnete der Theoretiker James Bardeen erstmals den Schatten, den ein Schwarzes Loch vor einem hellen Hintergrund werfen würde. Zugleich stellte er fest, es gäbe »keine Hoffnung darauf, den Effekt zu beobachten«. Jedoch wiesen die Astrophysiker Heino Falcke, Fulvio Melia und Eric Agol 2000 nach, dass ein Radioteleskop von der Größe der Erde in der Lage sein sollte, im Mikrowellenbereich den Schatten von Sagittarius A* zu sehen. Das offizielle Kick-off-Meeting für ein solches Projekt fand im Januar 2012 statt. Damit war das EHT geboren.

Blick ins galaktische Zentrum

Beim Sternbild Schütze (lateinisch: Sagittarius) verläuft das Band der Milchstraße. Im Mittelpunkt liegt Sagittarius A*. Die Beobachtungen mit dem Event Horizon Telescope konnten nur während Zeiträumen stattfinden, zu denen das Ziel von allen beteiligten Teleskopen aus am Himmel sichtbar war. Es musste sich also an sämtlichen Standorten auf der Nord- und der Südhalbkugel oberhalb des Horizonts befinden.

Fünf Jahre später, im April 2017, visierten Teleskope in Nord- und Südamerika, Hawaii, Europa und der Antarktis im Lauf von zehn Tagen koordiniert das Milchstraßenzentrum und andere Schwarze Löcher an und schrieben 65 Stunden lang Rohdaten auf 1024 Acht-Terabyte-Festplatten. Supercomputer in den USA und Deutschland bereiteten die gesammelten Informationen auf. Wiederum nach fünf Jahren präsentierte das EHT-Team das Ergebnis für Sagittarius A* in sechs Fachartikeln in einer Sonderausgabe der »Astrophysical Journal Letters«.

Manche Fragen geklärt, viele weiter offen

Das EHT-Bild bestätigte zunächst einmal das, was von Sagittarius A* zu erwarten war. Seine Entfernung von etwa 27 000 Lichtjahren ist lange bekannt. Ebenso hatte die genaue Vermessung der Umlaufbahnen von Sternen mit Infrarotteleskopen bereits seine Masse geliefert, nämlich das knapp Viermillionenfache der Sonne. Setzt man beide Zahlen in entsprechende Gleichungen auf Basis der allgemeinen Relativitätstheorie ein, kann man den Durchmesser des Schattens berechnen. Tatsächlich stimmt das Bild mit der Vorhersage überein. Konkret ist der Schatten von der Erde aus betrachtet lediglich 52 Mikrobogensekunden klein. Das ist so winzig, wie uns ein Donut auf dem Mond erscheinen würde. Er sieht dem Schatten des Objekts in M87 recht ähnlich, obwohl Letzteres um drei Größenordnungen massereicher ist.

Kombiniert mit Beobachtungen durch Röntgenteleskope und andere Instrumente helfen die EHT-Bilder, einige lange offene Fragen über die Umgebung von Sagittarius A* zu klären. Die Messung der Lichtspektren, also der einzelnen Frequenzen der von dem Objekt ausgesandten Strahlung, hat schon vor einiger Zeit ergeben, dass drumherum ein diffuses Plasma aus Elektronen und Protonen kreist. Jetzt gibt es eine viel bessere Vorstellung davon, woher diese Materie kommt. Laut Messungen des Chandra-Weltraumteleskops entzieht das Schwarze Loch das Plasma den Atmosphären der Sterne, die es umkrei-

sen. Die Mengen sind aber überschaubar und entsprechen eher einer Hungerkur für Sagittarius A*. Nicht einmal ein Prozent der Materie, die von der Schwerkraft des Schwarzen Lochs eingefangen wird, erreicht letztlich den Ereignishorizont. Deswegen leuchtet Sagittarius A* nur sehr schwach – lediglich 100-mal heller als unsere Sonne, obwohl es millionenfach massereicher ist.

Das war nicht immer so. Noch 60 oder 70 Jahre zuvor scheint Sagittarius A* eine regelrechte Fressorgie gefeiert zu haben. Diese Aktivität hat »Lichtechos« hinterlassen. Dabei handelt es sich um Strahlung, die von nahe gelegenen Staub- und Gaswolken abgeprallt ist und sich mit Röntgenteleskopen beobachten lässt. Von Zeit zu Zeit wird Sagittarius A* auch wieder aktiv. So ließ sich am 11. April 2017 ein heller Röntgenblitz messen. Die Ursache waren höchstwahrscheinlich sich verdrillende und neu verknüpfende Magnetfelder in der umherkreisenden Materie. Ähnliche dynamische Vorgänge verursachen Eruptionen der Sonne. Das EHT-Team hofft, solche Strahlungsausbrüche im galaktischen Zentrum in Zukunft direkt zu verfolgen. Künftige Beobachtungen sollen außerdem zeigen und mit etwas Glück sogar Filme dazu liefern, wie das Schwarze Loch die einfallende Materie verschlingt.

Darüber hinaus belegen die EHT-Aufnahmen, dass Sagittarius A* wie so ziemlich alles im Weltraum rotiert. Noch ist jedoch unklar, wie schnell. Auf jeden Fall lassen sich einige exotische Alternativhypothesen zum Charakter des Objekts ausschließen. Das Vorhandensein eines ausgeprägten Schattens ist auf einen Ereignishorizont zurückzuführen, das entscheidende Merkmal eines Schwarzen Lochs. Exotische Erklärungen wie eine »nackte Singularität«, das heißt ein unendlich dichter Punkt ohne Ereignishorizont, sowie weitere theoretisch denkbare Konstrukte scheiden aus. Das seltsame Ding im Zentrum unserer Galaxis ist ziemlich sicher ein ganz normales supermassereiches Schwarzes Loch. Damit ist es aber immer noch erstaunlich genug, um in nächster Zeit viele zusätzliche Geheimnisse preiszugeben. ◀

QUELLE

Event Horizon Telescope Collaboration et al.: First Sagittarius A* Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole in the center of the Milky Way. The Astrophysical Journal Letters 930, 2022

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

[spektrum.de/t/schwarze-loecher](https://www.spektrum.de/t/schwarze-loecher)



ISTOCK / OORKA



NASA, ESA, S. BARNUM AND C. ODEA (RIT), B. BERLEY AND W. COTTON (MIRACLES/INSTR), AND THE HERCULES/HERITAGE TEAM (SCIENCE/IRAC)
WWW.MIRACLES.EDU/PPR2012/HERCAV/CC-BY-3.0 (CREATIVE COMMONS BY/3.0) LEGALCODE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

klarer. »Es gab einen wirklich großen Wandel in diesem Bereich«, sagt Ramesh Narayan, ein theoretischer Astrophysiker an der Harvard University im US-amerikanischen Cambridge. »Schwarze Löcher haben sich als überraschend wichtige Gestalter und Kontrolleure der Galaxienentwicklung herausgestellt.«

Die unvorstellbar dichten Ansammlungen von Materie sind so etwas wie die Motoren der Galaxien. Ihre Schwerkraft zieht Staub und Gas in das Zentrum, wo sich eine wirbelnde Akkretionsscheibe um das supermassereiche Schwarze Loch bildet. Die Materie heizt sich auf und wird zu intensiv glühendem Plasma. Schließlich verleiht sich das Schwarze Loch die Materie ein – entweder nach und nach oder ganz plötzlich – und schleudert bei dem Vorgang eine Unmenge Energie zurück in die Galaxie. »Beim Wachstum eines Schwarzen Lochs wird Energie effizienter in die Umgebung abgegeben als bei jedem anderen

HERCULES A Beobachtungen der etwa zwei Milliarden Lichtjahre entfernten elliptischen Radiogalaxie zeigen Jets, die sich weit ins All erstrecken. Sie stammen vermutlich vom zentralen Schwarzen Loch, das etwa 1000-fach so massereich ist wie das der Milchstraße.

bekanntem Prozess«, sagt Astrophysiker Eliot Quataert von der Princeton University. Diese Rückkopplung wirkt sich auf die Sternentstehungsraten und die Strömungen in der gesamten Galaxie aus.

Es gibt bisher allerdings nur vage Vorstellungen davon, was den Energieausstoß auslöst und was ihn beendet. Viele Details der Verwandlung von einem supermassereichen Schwarzen Loch in einen »aktiven Galaxienkern«, der weithin sichtbar enorme Mengen an Strahlung aussendet, liegen im Dunkeln.

In mancherlei Hinsicht ähnelt das Phänomen einem anderen Effekt, der in kleinerem Maßstab auftritt. Zu einer so genannten stellaren Rückkopplung kommt es, wenn ein Stern als Supernova explodiert und Energie an seine Umgebung überträgt. Stellare Rückkopplungsprozesse können die Entwicklungen in kleinen Zwerggalaxien regulieren, während es für die wesentlich größeren elliptischen Galaxien die riesigen Triebwerke supermassereicher Schwarzer Löcher braucht.

Von ihrer Größe her liegt die Milchstraße als typische Spiralgalaxie in der Mitte zwischen beiden Extremen. Da es bei Sagittarius A* kaum Anzeichen von Tätigkeit gibt, ging man lange davon aus, der Werdegang unserer Galaxis würde von stellaren Rückkopplungen dominiert. Neuere Beobachtungen deuten jedoch auf den Einfluss eines aktiven Galaxienkerns hin. Untersuchungen des Zusammenspiels beider Rückkopplungsmechanismen in unserer Heimatgalaxie sowie die Lösung des Rätsels,

JET-RELIKTE Blasen im Röntgen- (blau) und Gammalicht (rot) reichen weit über und unter die Ebene der Milchstraße. Vermutlich gehen sie auf gebündelte Strahlung zurück, die vor Jahrmillionen für relativ kurze Zeit vom Kern der Milchstraße ausgestoßen wurde.

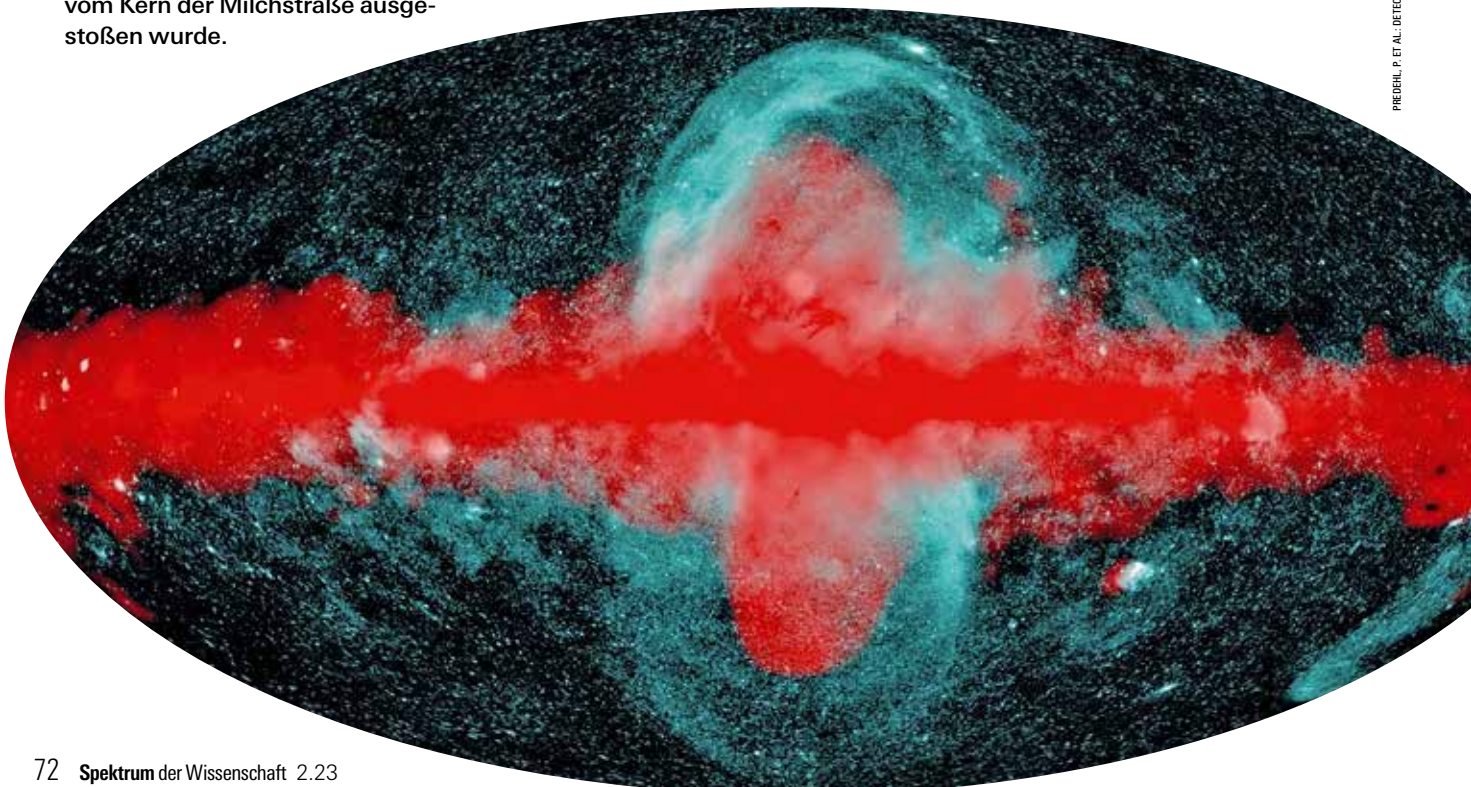
warum Sagittarius A* derzeit so ruhig ist, sollen Antworten auf eine allgemeinere Frage liefern: Wie hängen die Entwicklungen von Galaxien und ihren Schwarzen Löchern zusammen? Die Milchstraße »wird zum mächtigsten astrophysikalischen Labor«, hofft Natarajan.

In den späten 1990er Jahren hatte sich in der Fachwelt bereits die Ansicht durchgesetzt, dass sich in den galaktischen Zentren Schwarze Löcher befinden. Aus den Bewegungen der Sterne in ihrer Umgebung ließ sich ihre Masse herleiten. Dabei offenbarte sich eine seltsame Korrelation – je massereicher eine Galaxie ist, desto schwerer ist ihr zentrales Schwarzes Loch. »Das war eine völlig revolutionäre Einsicht. Irgendwie schien sich das Schwarze Loch mit seiner Galaxie auszutauschen«, resümiert Astrophysikerin Tiziana Di Matteo von der Carnegie Mellon University in Pittsburgh.

Begrenzte Reichweite, enormer Effekt

Der Zusammenhang ist deswegen überraschend, weil ein Schwarzes Loch, so gewaltig es auch sein mag, nur einen winzigen Teil der Galaxie ausmacht. Die Masse von Sagittarius A* entspricht zum Beispiel vier Millionen Sonnen, während in der Milchstraße insgesamt etwa 1,5 Billionen Sonnenmassen verteilt sind, das heißt das rund 400000-Fache. Der unmittelbare gravitative Einfluss des Schwarzen Lochs kann sich deswegen nur über die innersten Regionen der Galaxis erstrecken.

Der britische Astronom Martin Rees aus Cambridge hatte schon in den 1970er Jahren eine Hypothese aufgestellt, mit der sich die gesuchte Verbindung herstellen ließ. Rees zufolge treiben supermassereiche Schwarze Löcher die hell leuchtenden, gebündelten Materieströme (»Jets«) an, die sich in einigen weit entfernten Galaxien



beobachten lassen. Zusammen mit Donald Lynden-Bell, einem Kollegen von der University of Cambridge, erklärte er sogar das Leuchten im Zentrum der Milchstraße mit einem Schwarzen Loch. Könnten Rückkopplungen bei aktiven Galaxienkernen die Größe von supermassereichen Schwarzen Löchern überall im Kosmos regulieren? Die Grundidee: Je mehr Materie ein Schwarzes Loch verschluckt, desto heller wird es. Die Energiezunahme in der Umgebung presst wiederum Gas nach außen und hindert weiteren Nachschub daran, in das Schwarze Loch zu stürzen. Eine sehr große Galaxie drückt stärker auf ihr Zentrum. Dadurch wächst ihr Schwarzes Loch länger, bevor sich genug Gegenkraft aufgebaut hat.

Allerdings wollten sich viele nicht mit dem Gedanken anfreunden, einfallende Materie könnte auf so dramatische Weise wieder nach außen gelenkt werden. »Als ich meine Doktorarbeit geschrieben habe, galten Schwarze Löcher gemeinhin als Objekte, bei denen es kein Zurück mehr gibt und wo Gas bloß in eine Richtung strömt – nämlich hinein«, erinnert sich Natarajan, die in den 1990er Jahren als Doktorandin bei Rees die ersten Modelle zu entsprechenden Rückkopplungseffekten entwickelte. »Man musste sehr behutsam vorgehen, weil es so eine radikale Vorstellung war.«

Die erste Bestätigung kam einige Jahre später durch Computersimulationen, die von Di Matteo sowie Volker Springel vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching und Lars Hernquist vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics entwickelt wurden. »Wir wollten den Zoo verschiedenartigster Galaxien reproduzieren, den wir im realen Universum sehen«, erklärt Di Matteo.

Im frühen Universum begannen die Galaxien demnach als kompakte Objekte. Spult man in der Simulation durch die Äonen vor, vereinigen sich die Zwerge im Lauf spektakulärer Verschmelzungen, wobei Ringe, Wirbel und alle möglichen sonstigen Strukturen entstehen. Die Galaxien werden immer größer, während die Formenvielfalt wieder abnimmt und aus hinreichend vielen Kollisionen schließlich gigantische, diffuse Wolken aus Sternen hervorgehen. »Sie enden als Blob«, stellt Di Matteo fest. In den Simulationen konnten sie und ihre Kollegen diese strukturlosen Riesenleckse namens elliptische Galaxien rekonstruieren. Dazu mussten Spiralgalaxien viele Male aufeinandertreffen. Dabei trat jedoch ein Problem auf.

In Spiralgalaxien wie der Milchstraße sind viele junge Sterne enthalten, die blau leuchten. In elliptischen Galaxien hingegen gibt es nur noch alte Sterne. Die Gebilde sind laut Springel »rot und tot«. Aber jedes Mal, wenn das Team die Simulation laufen ließ, spuckte sie elliptische Galaxien mit blauen Sternen aus. Was auch immer die Sternentstehung in der Realität ausbremste, war in ihrem Computermodell nicht erfasst worden. »Dann kamen wir auf die Idee, unsere Galaxienverschmelzungen mit supermassereichen Schwarzen Löchern im Zentrum zu ergänzen«, erinnert sich Springel. »Wir ließen die Schwarzen Löcher Gas verschlucken und Energie freisetzen, bis alles auseinanderflog wie ein Schnellkochtopf. Plötzlich hörte die elliptische Galaxie mit der Sternbildung auf und wurde

AUF EINEN BLICK

Dynamisch verknüpft

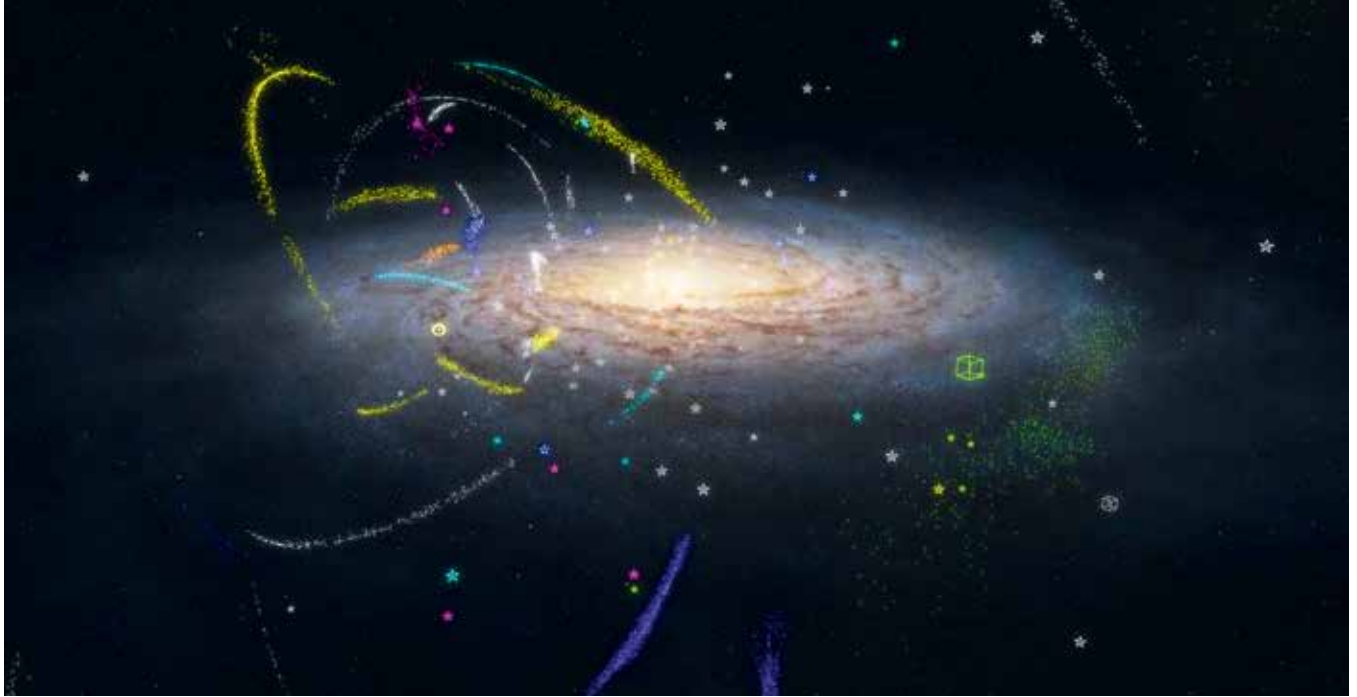
- 1** Die Schwerkraft supermassereicher Schwarzer Löcher wirbelt Staub und Gas um das galaktische Zentrum. Die Materie heizt sich auf und wird nach außen geschleudert, oft sogar gebündelt und in große Entfernungen.
- 2** Die Prozesse erzeugen einen Druck, der Nachschub daran hindert, in das Schwarze Loch zu stürzen. Das begrenzt sehr effizient dessen weiteres Wachstum.
- 3** Computersimulationen belegen den starken Einfluss der Aktivität der zentralen Schwarzen Löcher auf die Entwicklung ihrer Galaxie. Viele Details sind allerdings noch rätselhaft.

rot und tot. Mir fiel die Kinnlade herunter. So einen starken Effekt hatten wir nicht erwartet.«

Das untermauerte die Hypothesen von Rees und Natarajan zu Rückkopplungseffekten, mittels derer ein Schwarzes Loch trotz seiner relativ geringen Ausmaße mit der gesamten Galaxie kommuniziert. In den letzten zwei Jahrzehnten konnten weiterentwickelte und feiner auflösende Computerprogramme große Teile des Kosmos simulieren und den tatsächlichen Galaxienzoo reproduzieren. Die Berechnungen zeigen auch, dass die von den Schwarzen Löchern ausgestoßene Materie den Raum zwischen den Galaxien mit heißem Gas füllt, das ohne diesen Beitrag bereits abgekühlt und zu Sternen geworden wäre. »Inzwischen gelten supermassereiche Schwarze Löcher als sehr plausible Treiber der Entwicklung«, sagt Springel. »Niemand konnte bisher ein Modell entwickeln, das ohne sie auskommt.«

Die Rückkopplung wirkt – aber warum?

Dennoch sind die Simulationen immer noch erstaunlich undurchsichtig. Wenn Materie in die Akkretionsscheibe um ein Schwarzes Loch gelangt, führen Reibungseffekte einen Teil der Energie wieder nach außen ab. Doch wie viel das ist, muss man in den Modellen mühsam manuell ausprobieren. Die Details sind schwer zu fassen. »Möglicherweise erhalten wir in einigen Fällen die richtige Antwort aus dem falschen Grund«, meint Quataert. »Vielleicht übersehen wir die eigentlich wichtigen Aspekte für das Wachstum und den Energieübertrag bei Schwarzen Löchern.« Auch Di Matteo gesteht ein, dass nicht wirklich klar ist, wie die Rückkopplung bei aktiven Galaxienkernen funktioniert: »Wir wissen, wie wichtig sie ist. Aber ihre genauen Ursachen bekommen wir nicht zu



STERNSTRÖME Hochpräzise Vermessungen der Bewegungen von Sternen haben einige vergangene Verschmelzungen offenbart, bei denen kleinere Galaxien in unserer Galaxis aufgegangen sind. In dieser Illustration sind im Umfeld der Milchstraße Sterne in verschiedenen Farben dargestellt, die sich laut statistischer Analysen solchen Fusionen zuordnen lassen.

fassen. Es mangelt uns an einem tief greifenden physikalischen Verständnis der Rückkopplung.«

Ein Teil der Energie wird jedenfalls als Strahlung abgegeben, so viel ist unstrittig. Das verleiht den aktiven Galaxienkernen ihr charakteristisches helles Leuchten. Zudem schleudern Magnetfelder Materie in Form von diffusen galaktischen Winden oder als intensive gebündelte Jets aus der Akkretionsscheibe heraus. Der elektromagnetische Mechanismus, der rotierenden Schwarzen Löchern Energie entziehen und Jets erzeugen kann, wurde schon in den 1970er Jahren identifiziert, der so genannte Blandford-Znajek-Prozess. Aber welche Faktoren die Stärke des galaktischen Leuchtfuers bestimmen und wie viel von seiner Energie von der Galaxie wieder absorbiert wird, ist laut Narayan »weiterhin ein ungelöstes Problem«. Noch rätselhafter ist der galaktische Wind, der sich kugelschalenförmig von der Akkretionsscheibe ausbreitet. Weil er so ausladend ist, interagiert er tendenziell mehr mit der Galaxie als die schmalen Jets. »Die Preisfrage ist: Wie koppelt die Energie an das Gas?«, sagt Springel.

Einiges passt also nicht. Dafür spricht bereits die Tatsache, dass die Schwarzen Löcher in modernen kosmologischen Modellierungen in manchen Systemen kleiner sind als die tatsächlich beobachteten. Um die Sternentstehung zu unterbinden und rote und tote Galaxien zu erzeugen, müssen die Programme viel Energie aus den Schwarzen Löchern ausschleudern. Das würgt den Materiezuffluss ab. »Die Rückkopplung in den

Simulationen ist zu aggressiv eingestellt und bremst das Wachstum vorzeitig aus«, sagt Natarajan.

Ein anderes Problem ist genau gegenteilig gelagert, und die Milchstraße ist ein Beispiel dafür. Vergleichbare simulierte Galaxien beherbergen Schwarze Löcher, die drei- bis zehnmal größer sind als Sagittarius A*. Ein genauerer Blick auf die Abläufe bei der Rückkopplung in der Milchstraße und nahe gelegenen Galaxien liefert möglicherweise Hinweise, die dabei helfen, die Diskrepanzen zu beseitigen.

Im Dezember 2020 führten Messungen mit dem Röntgenteleskop eROSITA zur Entdeckung zweier Blasen, die im Röntgenbereich leuchten und sich zehntausende Lichtjahre über und unter der Ebene der Milchstraße erstrecken. Die gigantischen Auswölbungen ähneln ebenso verblüffenden sphärischen Strukturen im Spektrum der Gammastrahlen, die ein Jahrzehnt zuvor im Fermi Gamma-ray Space Telescope aufgetaucht waren. Seinerzeit wurden noch heftig zwei verschiedene Hypothesen über den Ursprung der »Fermi-Blasen« diskutiert. Einige hielten sie für Überbleibsel eines Jets, der vor Millionen von Jahren aus Sagittarius A* herausgeschossen ist. Andere vermuteten eher eine Art aufsummierter stellarer Rückkopplung und schrieben die Blasen den Explosionen etlicher Sterne in der Nähe des galaktischen Zentrums zu.

Als Hsiang-Yi Karen Yang von der taiwanesischen Tsing-Hua-Nationaluniversität die eROSITA-Aufnahmen sah, spekulierte sie sofort über einen gemeinsamen Ursprung der zwei Blasen im Röntgen- und im Gammalicht. Dazu hätten beide von demselben Jet aus einem aktiven Kern in der Milchstraße erzeugt werden müssen. Die Röntgenstrahlen wären dann indirekt durch Gas hervorgerufen worden, das der Jet getroffen und zum Leuchten angeregt hat. Zusammen mit der Plasmaphysikerin Ellen Zweibel und dem Spezialisten für Rückkopplungsprozesse Mateusz Ruszkowski, beide aus den USA, erstellte sie ein Computermodell. Die Ergebnisse des Teams erschienen im März 2022 im Fachmagazin »Nature

Astronomy« und erklärten die Form der beobachteten Blasen und der hell leuchtenden Stoßfront. Die Strukturen müssten sich demzufolge im Lauf von 2,6 Millionen Jahren aus einem Jet gebildet haben, der 100 000 Jahre lang aktiv gewesen ist. Diese Zeitskalen sind viel zu kurz für eine stellare Rückkopplung.

Somit bleibt bloß die Möglichkeit, dass sich die Galaxienkerne in gewöhnlichen Scheibengalaxien wie der Milchstraße weitaus stärker auswirken als bisher angenommen. Yang spricht von einer Art Ökosystem, in dem der aktive Kern, die stellare Rückkopplung sowie das diffuse, heiße Gas in der Umgebung miteinander verflochten sind. Je nach Galaxientyp und Zeitraum herrschen unterschiedliche Effekte und Strömungsmuster vor.

Kartierungen der Sternbewegungen offenbaren galaktische Verschmelzungen

Untersuchungen zur Geschichte und Gegenwart der Milchstraße könnten das Zusammenspiel der Prozesse enthüllen. Mit dem europäischen Weltraumteleskop Gaia lassen sich beispielsweise die Positionen und Bewegungen von Millionen Sternen extrem genau kartieren. Das ermöglicht Rückschlüsse auf vergangene Verschmelzungen mit kleineren Galaxien. Im Prinzip könnten solche Ereignisse den supermassereichen Schwarzen Löchern einen Aktivitätsschub verleihen, indem sie frische Materie heranschaffen. Dann würde der Galaxienkern aufleuchten oder Jets ausbilden. »Zu der Frage nach der Bedeutung von Fusionen läuft auf dem Gebiet eine rege Debatte«, stellt Quataert fest. So deuten die Gaia-Daten darauf hin, dass in dem Zeitraum, in dem die mit Fermi und eROSITA detektierten Blasen entstanden sind, keine kleinere Galaxie mit der Milchstraße verschmolzen ist. Dann hätte zumindest dieser Jet eine andere Ursache gehabt. Eventuell stoßen herumvagabundierende Gasreservoirs zufällig auf das Schwarze Loch und aktivieren es. Es könnte auf chaotische Weise zwischen Materieaufnahme, Energieausstoß und Ruhephasen wechseln.

Die 2022 veröffentlichte Aufnahme von Sagittarius A* mit dem Event Horizon Telescope gibt angesichts der nur spärlich einfallenden Materie ein neues Rätsel auf. Zuvor war zwar klar, dass nicht alles Gas, das von außen gen Mitte einer Galaxie gezogen wird, es bis zum Ereignishorizont des Schwarzen Lochs schafft. Schließlich wirken die galaktischen Winde, die ständig als Strom aus den Zentralbereichen ausgestoßen werden, der Akkretion entgegen. Aber zur Erklärung eines so extrem verdünnten Flusses müssten sie unrealistisch stark sein. »Bei meinen Simulationen sehe ich keine solch immensen Winde«, sagt Narayan. »Das Phänomen reicht einfach nicht für eine vollständige Beschreibung des Geschehens aus.«

Ein Teil der Herausforderung sind die sehr unterschiedlichen Größenskalen, die bei den Phänomenen eine Rolle spielen. Sterne und Schwarze Löcher auf der einen Seite sind viel kleiner als Galaxien und deren Umgebung auf der anderen Seite. Bei der Simulation eines physikalischen Prozesses werden jeweils die Effekte berücksichtigt, die auf dem entsprechenden Maßstab relevant sind. In der

Realität hängen jedoch alle Abläufe zusammen. »Verglichen mit der großen Galaxie ist das Schwarze Loch wirklich winzig. Man kann nicht alles in eine einzige überbordende Simulation packen«, erläutert Narayan. »Jedes System ist auf Informationen aus den anderen Bereichen angewiesen, aber es ist oft nicht klar, wie sich die Verbindung herstellen lässt.«

Narayan und Natarajan wollen die Lücken mit verschachtelten Simulationen schließen und ein stimmiges Modell der Strömungen in der Milchstraße und der nahe gelegenen Galaxie Messier 87 erstellen. Das soll auch mehr Klarheit über die Bewegungen des diffusen Gases in und um Galaxien bringen. »Es ist ein entscheidender Teil des ganzen Ökosystems«, betont Quataert. »Wie gelangt all das Gas zum Schwarzen Loch, und wie wird aus ihm dort Energie, die nach außen strebt?« Bei dem neuen Ansatz müssen sämtliche Eingaben und Ausgaben zwischen Berechnungen auf verschiedenen Größenordnungen ineinandergreifen. Dann muss man an weniger Stellschrauben drehen. »Wenn wir die Simulation richtig aufsetzen, wird aus ihr von selbst konsistent hervorgehen, wie viel Gas das Schwarze Loch erreicht«, hofft Narayan. »So können wir detailliert nachschauen, warum es so wenig von der verfügbaren Gesamtmenge aufgenommen hat.« Eine Reihe von Momentaufnahmen soll Galaxien in verschiedenen Phasen ihrer Entwicklung darstellen.

Noch sind viele Abläufe in den galaktischen Ökosystemen rätselhaft. Yang ist allerdings optimistisch: »Gerade bricht eine neue Ära an, in der man beginnt, über die Überschneidungen zwischen den verschiedenen Szenarien nachzudenken. Ich hoffe, dass ich dort, wo ich bislang keine klare Antwort habe, sie in ein paar Jahren geben kann.« ◀

QUELLEN

Kruijssen, J. M. D. et al.: Kraken reveals itself – the merger history of the Milky Way reconstructed with the E-MOSAICS simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 498, 2020

Malhan, K. et al.: The Global Dynamical Atlas of the Milky Way mergers: Constraints from Gaia EDR3 based orbits of globular clusters, stellar streams and satellite galaxies. *The Astrophysical Journal* 926, 2022

Roberts, S. R. et al.: Towards self-consistent modelling of the Sgr A* accretion flow: Linking theory and observation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 466, 2017

Yang, H.-Y. K. et al.: Fermi and eROSITA bubbles as relics of the past activity of the Galaxy's central black hole. *Nature Astronomy* 6, 2022



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »What Drives Galaxies? The Milky Way's Black Hole May Be the Key« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

GEOMETRIE

Die Mathematik des Knitterns

Wenn man ein Blatt Papier zerknüllt und wieder glatt zieht, entstehen scheinbar willkürlich angeordnete Falten. Eine neue geometrische Theorie kann diese Muster nun erklären.

► spektrum.de/artikel/2085744



Stephen Ornes ist Wissenschaftsjournalist in Nashville, Tennessee.

► Ian Tobasco nahm auf der Bühne eines Hörsaals der University of Michigan ein großes Blatt Papier in die Hand und zerknüllte es. Vor dem Publikum, das dem Vortrag des Mathematikers im Jahr 2018 lauschte, hielt er die Kugel hoch und drückte sicherheitshalber nochmals fest zu. Dann breitete er das Blatt wieder aus und strich es glatt. »Wie Sie sehen, scheinen die Falten willkürlich angeordnet. Und genau darum geht es mir«, erklärte er. »Warum hat sich ausgerechnet dieses Muster gegen andere Anordnungen von Falten durchgesetzt. Warum ist kein viel ordentliches Ergebnis entstanden?«

Dann hielt er ein zweites Stück Papier hoch, das er zuvor fein säuberlich zu einem berühmten Origami namens Miura-ori gefaltet hatte. Er legte es auf den Tisch

und drückte mit seiner Hand darauf. Als er das Blatt anschließend entfaltete, kamen viele Parallelogramme zum Vorschein, die sich aus den Knicken ergeben. Die Kraft, die er beim Zusammenknüllen der Papierkugel und beim Flachdrücken des Origami ausgeübt hatte, sei in etwa die gleiche gewesen, beteuerte Tobasco. Aber die Ergebnisse könnten kaum unterschiedlicher sein: Das Origami-Blatt war fein säuberlich in geometrische Bereiche unterteilt; der zerknüllte Ball hingegen bestand aus einem Durcheinander von sich kreuzenden Linien. »Man könnte meinen, dass das«, dabei zeigte Tobasco auf die chaotische Anordnung, »eine zufällige, ungeordnete Version davon ist.« Er hielt das ordentliche Miura-Papier hoch. »Aber wir wissen noch nicht, ob diese Vermutung stimmt oder nicht.«

Um zu untermauern, dass es zwischen den geordneten Faltenmustern und den zerknitterten Blättern eine Verbindung gibt, braucht man mathematische Regeln, die allgemein vorhersagen, wie die Muster entstehen. Bis vor Kurzem war aber noch nicht einmal klar, ob ein solcher Regelsatz überhaupt existiert.

Tobasco widmete sich in den darauffolgenden Jahren dem ehrgeizigen Ziel, solche Regeln zu finden. Dafür hat er Gleichungen untersucht, die dünne elastische Materia-

lien beschreiben. Diese Stoffe zeichnen sich dadurch aus, dass sie nach einer Verformung versuchen, in ihre ursprüngliche Form zurückzukehren. Wenn man zum Beispiel einen Stab gegen einen aufgeblasenen Luftballon presst, entsteht an der Druckstelle ein sternförmiges Muster aus Falten; sobald man den Stab entfernt, füllt sich der eingedrückte Raum wieder mit Luft und die Oberfläche glättet sich. Ähnlich ist es mit einem zerknüllten Zettel: Drückt man ihn nicht mehr zusammen, dehnt er sich aus – auch wenn er sich nicht vollständig entknittert. Fachleute aus den Ingenieurwissenschaften und der Physik untersuchen schon lange, wie diese Muster in speziellen Situationen entstehen. Mathematikerinnen und Mathematiker stellen sich hingegen eine grundlegendere Frage: Lässt sich allgemein verstehen, warum ein bestimmtes Faltenmuster einem anderen vorgezogen wird?

Falten lösen ein geometrisches Problem

Im Januar 2021 hat Tobasco eine Arbeit veröffentlicht, in der er die Frage bejaht - zumindest für schalenförmige Figuren (also dünne gekrümmte Filme), die flachgedrückt werden. Seiner Theorie zufolge enthalten die scheinbar zufälligen Muster »geordnete« Bereiche. Die Falten weisen in diesen Zonen demnach ein sich wiederholendes, identifizierbares Verhalten auf. Insbesondere konnte er damit zeigen, dass die Faltenbildung in ihren vielen Erscheinungsformen eine Lösung für ein geometrisches Problem bildet.

Ein Jahr später konnte Tobasco seine Theorie in realistischen Situationen testen: Mit Hilfe von Experimenten und Computersimulationen bestätigte er seine Vorhersagen. Damit wurden erstmals auf elegante Weise die mathematischen Regeln hinter dem alltäglichen Phänomen des Knitterns offengelegt, das sich nun verstehen lässt. »Es ging nicht darum, eine Vermutung zu beweisen, die Physiker bereits aufgestellt hatten«, betont Robert Kohn, Analysis-Professor am Courant Institute der New York University und Doktorvater von Tobasco. »Stattdessen musste man quasi von Grund auf eine neue Theorie entwickeln.«

Das Vorhaben ist nicht neu. Schon im 19. und 20. Jahrhundert widmeten sich Fachleute dieser Herausforderung. Allerdings konzentrierten sie sich dabei meist auf spezifische Probleme, anstatt einen allgemeinen Lösungsansatz zu suchen. Sie fanden Lösungen für ganz bestimmte Objekte in ganz bestimmten Umgebungen. Frühe Arbeiten versuchten beispielsweise zu erklären, wie man eine gekrümmte Metallplatte möglichst glatt schmieden könnte – oder wie die Entstehung von Bergen mit der Erwärmung der Erdkruste zusammenhängt.

In den letzten Jahren bemühten sich Koryphäen aus Mathematik und Physik vermehrt darum, theoretische Erkenntnisse und experimentelle Beobachtungen in Einklang zu bringen. Zudem begannen sie, ein breites Spektrum von Situationen, Geometrien und Materialien zu analysieren. Inzwischen ist es dadurch möglich, die Faltungsmuster von flachgedrückten Objekten ziemlich präzise mit Hilfe von Computersimulationen vorherzusagen. Dafür muss man dem Rechner extrem viele Details füttern, damit er den Prozess erfolgreich modelliert. Doch zu einem größeren Verständnis trägt das kaum bei: Auf diese Weise lässt sich beispielsweise nicht herausfinden, ob es einen kleinen Satz an Eigenschaften gibt, anhand derer man bestimmte Muster vorhersagen kann.

»In den letzten zehn Jahren führte man immer wieder Experimente durch und versuchte im Nachhinein, eine passende Theorie zu finden, welche die Ergebnisse beschreibt«, erklärt der Mathematiker Dominic Vella von der University of Oxford. »Erst seit Kurzem fangen wir an, die Zusammenhänge richtig zu verstehen.«

AUF EINEN BLICK

Das Chaos verstehen

- 1** Schon lange versuchen Fachleute vorherzusagen, wo Falten in gekrümmten Materialien entstehen, wenn man diese flach drückt.
- 2** Bisher konnte man nur spezielle Situationen untersuchen; die allgemeinen Regeln, denen die Knittermuster folgen, waren unbekannt.
- 3** Nun hat ein Mathematiker eine Theorie des Knitterns entwickelt und deren Vorhersagen mit Hilfe von Experimenten und Computersimulationen bestätigt.

Der Weg dahin ist von spannenden Meilensteinen geprägt: Zum Beispiel untersuchte der Maschinenbauingenieur Pedro Reis vom Massachusetts Institute of Technology zusammen mit seinen Kollegen im Jahr 2015 verschiedene Arten von Kugeln, aus denen man die Luft herausaugt. Wie sie entdeckten, sind für die entstehenden Faltenmuster nur zwei Größen entscheidend: die Krümmung und der Druck, mit dem die Luft entzogen wird. Alles andere, etwa die elastischen Eigenschaften des Materials, spielen für das Ergebnis keine Rolle. Damit ließ sich zeigen, dass man nicht, wie für aufwändige Simulationen üblich, extrem viele Details eines Stoffs kennen muss, um verlässliche Vorhersagen zu erhalten – nur wenige Merkmale des Systems sind entscheidend.

Zwei Jahre später untersuchte Vella mit seinen Kolleginnen und Kollegen dünne elastische Filme, die man mit einem spitzen Gegenstand eindrückt. Sie wollten herausfinden, wie sich das Faltenmuster verändert, wenn man die Tiefe der Delle variiert. Dafür zählten sie die entstandenen Falten sowie andere Details und bekamen somit einen Einblick, wie stark bestimmte Eigenschaften eines Materials vom ausgeübten Druck abhängen.

Ein außergewöhnliches Hobby liefert die Lösung

Auch wenn die Fortschritte darauf hindeuteten, dass es eine recht simple Theorie der Faltenbildung geben könnte, lösten sie nur Teile des eigentlichen Problems. Sie erklärten nicht, wie die Falten entstehen und warum sie genau so angeordnet sind. Um ein allgemeineres mathematisches Verständnis zu erlangen, war ein anderer Ansatz erforderlich.

Dazu kam es durch eine zufällige Entdeckung, die der Physiker Joey Paulsen von der Syracuse University in New York machte. Zu Beginn seiner Karriere untersuchte er die Eigenschaften ungewöhnlicher Materialien: ultradünne Polymerfilme. Um diese herzustellen, erzeugte er zunächst eine spezielle Flüssigkeit, die Spuren des gelösten Polymers enthielt, und legte das Fluid auf eine Drehscheibe. Er brachte den Großteil der Flüssigkeit zum Verdampfen, während sich das Polymer unter dem Einfluss der Rotation gleichmäßig auf der Scheibe verteilte und zu einer dünnen Schicht verfestigte. Als Paulsen sein eigenes Labor in Syracuse hatte, lernte er, wie er die Beschichtung anpassen musste, um gekrümmte Filme herzustellen, die ultradünnen Schildkrötenpanzern ähneln.

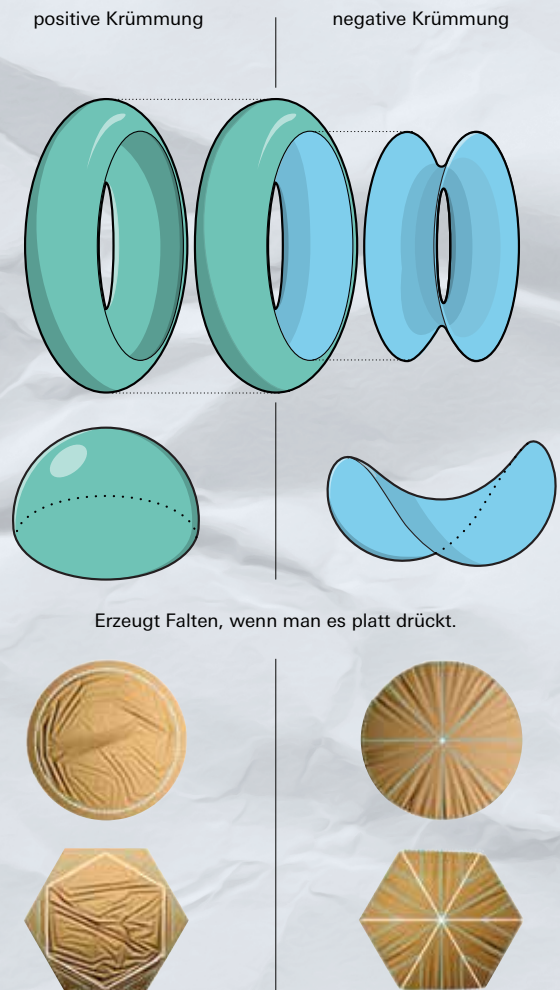
Eines Tages legte er einige der Panzer auf ruhendes Wasser und hielt fotografisch fest, wie sich die dünnen Schichten auf der Wasseroberfläche absetzen. Die Filme werden dabei flach gedrückt und entwickeln ein Faltenmuster. »Das war aus reiner Neugierde«, sagt er. Diese Aufnahmen fielen Tobasco ins Auge, als er sich 2017 mit Paulsen traf. »Die Bilder zeigen scheinbar zufällig entstehende Faltenmuster. Wenn man das Experiment zweimal hintereinander durchführt, erhält man zwei völlig verschiedene Ergebnisse«, erklärt Tobasco, der jetzt an der University of Illinois in Chicago lehrt. »Ich wollte die Muster aus wenigen Eigenschaften der gekrümmten

Filme ableiten. Das Modell sollte allgemein genug sein, um sich nicht von Probe zu Probe zu ändern.«

Das Faltenmuster eines Objekts entspricht der Konfiguration mit der niedrigsten Energie, die sich durch den ausgeübten Druck ergibt. Wenn man einen dünnen Polymerfilm auf einer Ebene absetzt, verformt er sich so lange, bis er die geometrische Anordnung erreicht, die am wenigsten Energie benötigt, um sie aufrechtzuerhalten. »Man kann Muster nach der Energiemenge ordnen, die sie besitzen, während sie entstehen«, erklärt Tobasco.

Grundlagen des Knitterns

Je nachdem, wie ein Objekt geformt ist, hat es positive oder negative gaußsche Krümmung. Das kann über die Art der Falten entscheiden, wenn man es platt drückt.



So konnte er einige Merkmale des Polymerfilms ausmachen, die dessen endgültige Form maßgeblich beeinflussen. Wie sich herausstellte, bestimmen diese Eigenschaften das erzeugte Muster vollständig. Eine wichtige Rolle spielt dabei ein Maß für die Gestalt der Fläche, die so genannte gaußsche Krümmung. Eine Oberfläche mit positiver gaußscher Krümmung biegt sich an allen Stellen von einer Ebene weg, wie die Außenseite einer Kugel. Negativ gekrümmte Oberflächen sind hingegen sattelförmig, wie ein Pringles-Chip: Eine Richtung ist nach oben, die andere nach unten gebeugt.

Tobasco fand heraus, dass in Flächen mit positiver gaußscher Krümmung die geordneten und ungeordneten Bereiche auf ganz bestimmte Art angeordnet sind, während negative Krümmung eine andere Art von Muster ergibt. »Die genaue Geometrie ist gar nicht so entscheidend«, erklärt Vella. »Es kommt wirklich nur auf das Vorzeichen der gaußschen Krümmung an.«

Die beiden Forscher hatten zwar vermutet, dass diese Größe wichtig für die Faltenbildung ist. Aber laut Vella überraschte es sie, dass die Muster so stark vom Vorzeichen abhängen. Und wie sich später herausstellte, lässt sich Tobascos Theorie wider Erwarten auf ein breites Spektrum elastischer Materialien anwenden – und nicht nur auf die speziellen Formen, die Paulsen in seinem Labor erzeugt hatte.

Anfang 2018 war die Theorie des Knitterns weitgehend fertig gestellt. Auf dem Papier schien sie zu funktionieren, doch Tobasco konnte nicht sicher sein, dass sie wirklich korrekt ist, wenn er sie nicht in der realen Welt getestet hatte. Daher nahm er wieder zu Paulsen Kontakt auf und fragte ihn, ob er an einer Zusammenarbeit interessiert sei. »Es hat auf Anhieb funktioniert«, erinnert sich der Physiker. »Als wir einige von Ians Vorhersagen über unsere Aufnahmen legten, stimmten die Muster überein.«

Eine Verbindung aus Computersimulationen, Experiment und Theorie

Aber das allein genügte Tobasco nicht. Auf einer Konferenz über mathematische Aspekte der Materialwissenschaft lernte er im Jahr 2020 die Physikerin Eleni Katifori von der University of Pennsylvania kennen, die sich mit einem ähnlichen Problem beschäftigte: Sie untersuchte die Faltungsmuster in schalenförmigen Figuren mit Hilfe von Computersimulationen und erstellte eine Datenbank mit ihren Ergebnissen. »Ians Arbeit konnte einige Bereiche der entstehenden Muster in unseren Simulationen erklären«, sagt sie.

Es war fast schon unheimlich: Nach den ersten Gesprächen war klar, dass Tobascos Theorie, Paulsens experimentelle Bilder und Katiforis Modellierungen genau dieselben Phänomene beschrieben. Die anfängliche Aufregung wich aber schnell der Skepsis – es schien zu schön, um wahr zu sein. »Tobasco ist Mathematiker und macht all diese Dinge auf sehr abstrakte Art«, sagt Paulsen und verweist darauf, dass Tobascos Ideen zu Krümmungen weit über zweidimensionale flache Materialien hinausgehen. »Betrachten wir wirklich dieselben Systeme?

Unsere Ergebnisse stimmen zwar überein, aber ist das vielleicht nur Zufall?«

In den folgenden zwei Jahren haben die drei Forscher die Details ausgearbeitet und konnten zeigen, dass Tobascos Theorie tatsächlich die Anordnung der Falten exakt vorhersagte, die Paulsen in seinen Experimenten und Katifori in ihren Computermodellen gefunden hatten. Am 25. August 2022 veröffentlichten sie einen Artikel in der Fachzeitschrift »Nature Physics«, in dem sie erklären, wie die drei unterschiedlichen Ansätze die gleiche, einfache geometrische Anordnung der Falten ergeben. Laut ihren Ergebnissen lassen sich die Muster in mehrere Familien gleichschenkliger Dreiecke aufteilen, welche die Bereiche von Ordnung und Unordnung abgrenzen.

Die Resultate beschränken sich dabei nicht auf mathematische Abstraktionen von unmöglich dünnen Materialien, sondern lassen sich auf reale Stoffe anwenden, die eine endliche Ausdehnung haben. Katifori möchte diese Vorhersagen nutzen, um die Entwicklung neuer Materialien voranzutreiben. »Ich will verstehen, wie man Oberflächen gestalten kann, damit die Faltenmuster so ausfallen, wie man es wünscht.«

Eine offene Frage ist, wie allgemein die Theorie wirklich ist: Welche Arten von gekrümmten Oberflächen lassen sich auf diese Weise untersuchen und wo liegen ihre Grenzen? Tobasco arbeitet bereits aktiv daran, das herauszufinden, und untersucht andere Geometrien, etwa solche mit Löchern.

Aber selbst in ihrer jetzigen Form ist die Theorie schön und überraschend, betont Paulsen. »Wenn ich Ihnen die Gestalt eines gekrümmten Films vorgebe und die einfachen Regeln aus Ians Theorie, dann können Sie einen Zirkel und ein Lineal nehmen und die Falten zeichnen«, erklärt er. »Es hätte nicht so kommen müssen. Die Zusammenhänge hätten wesentlich komplizierter ausfallen können.«

QUELLEN

Reis, P.M. et al.: Curvature-induced symmetry breaking determines elastic surface patterns. *Nature Materials* 14, 2015

Tobasco, I.: Curvature-driven wrinkling of thin elastic shells. *Archive for Rational Mechanics and Analysis* 239, 2021

Tobasco, I. et al.: Exact solutions for the wrinkle patterns of confined elastic shells. *Nature Physics* 18, 2022

Vella, D., Taffetani, M.: Regimes of wrinkling in pressurized elastic shells. *Philosophical transactions of the royal society A* 375, 2017



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »The New Math of Wrinkling« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

Oberfläche statt Schall

In ihrer Kolumne »Chemische Unterhaltungen« erklärten Matthias Ducci und Marco Oetken die Funktionsweise von Taschenwärmern.

(»Kristalle für warme Hände«, »Spektrum« Dezember 2022, S. 56)

Attila Vass, München: Wie Sie schön beschreiben, können wir durch eine Temperaturerhöhung und eine anschließende Abkühlung eine übersättigte Lösung herstellen. Jedoch stören mich Ungenauigkeiten. Die Aussage »Knickt man das in dem Beutel befindliche Metallblättchen, breitet sich eine Schallwelle aus. Diese führt zu Verdichtungen, welche das gelöste Salz kristallisieren lassen« ist nach meiner Ansicht falsch.

Ein Anstoßen der Kristallisation von Natriumacetat durch Schallwellen konnte noch nicht verifiziert werden. Was gelingt, ist das Verwen-

den von Kristallisationskeimen durch Zugabe von einzelnen Kristallen oder das Verwenden einer energiereichen Oberfläche. Diese erhalten wir durch Knicken eines Metallblättchens.

Was passiert dabei? Zunächst ist die Oberfläche durch die wässrige Lösung inhibiert – eine dissoziative Chemisorption von H₂O führt zu einer Hydroxilierung der Metalloxid-Oberfläche. Dehnen (oder stauchen) wir diese spröde Schicht, so wird sie spätestens ab dem Knickpunkt eine frische aktive Oberfläche aufweisen.

Wir vom Studiengang Chemische Technik an der Hochschule München sind dabei, kurze Videos zu drehen, um diese These zu verifizieren. Erste Vorversuche sind sehr erfreulich.

Kein vollwertiger Ersatz

Michael S. Gold, Hang Lin und Meagan Makarczyk von der University of Pittsburgh stellten ein Verfahren vor, bei dem künstliche Gelenke auf Biochips helfen sollen, Krankheitsmechanismen zu erforschen.

(»Das Kniegelenk auf einem Chip«, »Spektrum« November 2022, S. 40)

Thomas Kolbe, Großweikersdorf: Organs-on-a-Chip sind mittel- bis langfristig sicher wichtige Ergänzungen zu Tierversuchen, um deren Zahl zu reduzieren. Aber an dem vorgestellten Beispiel zeigen sich die Limitierungen der In-vitro-Technik: Statt eines systemischen Ansatzes wie im lebenden Tier ist nur ein kleiner Ausschnitt des Krankheitsgeschehens untersuchbar. Es fehlt etwa die mechanische Belastung des Knorpelgewebes, die für dessen Aufbau und Regeneration wichtig ist. In einer anderen Arbeit wurde 2019 von einer Gruppe um Paola Occhetta am Universitätsspital Basel ein Organ-on-a-Chip entwickelt, bei dem regelmäßige mechanische Belastung auf Knorpelzellen einwirkt. Aber dort mangelte es an Neuronen und Makrophagen, die hier im Beitrag

Anwendung fanden. Und beiden Modellen ist gemeinsam, dass der Einfluss von Alter und Hormonen komplett fehlt.

Es ist also eine zusätzliche Technik, Details zu verstehen, jedoch sicher kein vollwertiger Ersatz für den Tierversuch. Unter dem Begriff »personalisierte Medizin« wird suggeriert, dass diese Labortechniken in der Zukunft massgeschneiderte Therapien ermöglichen. In der Realität werden sich das nur wenige Patienten leisten können. Als Medizin für alle kommt das leider kaum in Frage. Eher als Testsystem für pharmakologische Substanzen.

Sinnvolle Öffnung

Elektrochemische Methoden könnten dort abhelfen, wo traditionelle Synthese an ihre Grenzen stößt.

(»Strom, marsch!«, »Spektrum« November 2022, S. 56)

Thomas Nickl, per E-Mail: Seit dreieinhalb Jahrzehnten bin ich Abonnent und erlebe eine zunehmende Öffnung dieser ursprünglich von der Physik dominierten Zeitschrift. Ein sehr positiver Durchbruch bestand vor vielen Jahren darin, Artikel zu Geschichte, Archäologie, aber auch Wissenschaftsphilosophie aufzunehmen, denn gemeinsame Podien für Geistes- und Naturwissenschaften sind nicht eben häufig. Das Novemberheft 2022 stellt einen weiteren Durchbruch dar.

Der Artikel wagt sich an komplexe organische Formeln und verwendet mit Selbstverständlichkeit gehobene chemische Fachsprache. Im Prinzip so, wie Artikel mit physikalischen Inhalten in »Spektrum« schon immer gestaltet waren. Ich gratuliere zu dieser sinnvollen und notwendigen Öffnung, empfehle aber dennoch, dem chemisch nicht einschlägig vorgebildeten Leser die Lektüre noch mehr zu erleichtern, zum Beispiel durch grafische Darstellung beziehungsweise ein etwas umfangreicheres Glossar.

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](https://www.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.

In der Unendlichkeit steckt oft mehr, als man denkt

Primzahlen genießen in der Zahlentheorie ganz besonderes Interesse. Manchmal lohnt es sich aber auch, jene Zahlen zu betrachten, die nicht zu dieser prominenten Gruppe gehören.

► spektrum.de/artikel/2085747

In der britischen Zeitschrift »The Educational Times« konnte man 1905 unter der Überschrift »Questions for Solution« eine kurze Notiz eines »Rev. J. Cullen« lesen. Zweck dieser Rubrik war es, mathematische Aufgaben zu publizieren und die Leserschaft aufzufordern, eine Lösung zu finden. In Frage Nummer 15897 interessierte sich der irische Priester und Mathematiker James Cullen für Zahlen der Form:

$$C_n = n \cdot 2^n + 1$$

Er behauptete, dass unter allen natürlichen Zahlen, die man für $n = 1$ bis 99 auf diese Weise bilden kann, nur eine einzige gebe, die eine Primzahl ist. Man muss nicht lange probieren, um sie zu entdecken; es genügt, in der obigen Gleichung $n = 1$ zu setzen. Dann nimmt C_1 den Wert 3 an. Um zu zeigen, dass für alle anderen Zahlen n , die kleiner als 100 sind, C_n keine Primzahl ist, muss man sich allerdings ein bisschen mehr anstrengen.

James Cullen war sich ziemlich sicher, dass seine Vermutung stimmt, hatte aber Zweifel, was $n = 53$ angeht. Erst ein Jahr später konnte der Mathematiker Allan Cunningham bestätigen, dass C_{53} tatsächlich eine zusammengesetzte Zahl ist – und gleichzeitig auch alle anderen Fälle bis $n = 200$ abhandeln. Nur bei $n = 141$ vermutete er eine Ausnahme; bewiesen wurde diese dann 1958.

Im Lauf der Zeit widmeten sich immer mehr Menschen der Untersuchung von »Cullen-Zahlen«. Unter den ersten 1000 sind nur die Fälle $n = 1$ und $n = 141$ Primzahlen. Danach wurden 14 weitere Cullen-Primzahlen gefunden, von denen die größte durch $n = 6\,679\,881$ gebildet wird. Man vermutet, dass es unendlich viele derartige Primzahlen gibt, das ließ sich bisher aber noch nicht zweifelsfrei nachweisen.

In solchen Fällen kommt man mit dem Untersuchen immer größerer Werte nicht ans Ziel, sondern muss einen allgemeinen Beweis führen.

Bei den so genannten »Riesel-Zahlen« scheint das auf den ersten Blick anders zu sein. Darunter versteht man eine natürliche, ungerade Zahl k , falls die Folge $k \cdot 2^n - 1$ für alle $n \geq 1$ keine Primzahl enthält. Der schwedische Numeriker Hans Riesel, nach dem die Zahlen benannt sind, fand 1956 ein Beispiel mit $k = 509\,203$. Später kamen eine Hand voll weitere Riesel-Zahlen hinzu, die aber alle noch größer ausfielen. Deshalb möchten Mathematiker herausfinden, ob es kleinere Riesel-Zahlen gibt. Doch Vorsicht: Selbst wenn es so scheint, als müsse man dafür nur die restlichen knapp 500 000 Ziffern abklappern, landet man am Ende erneut bei der Unendlichkeit. Denn jedes k erzeugt eine unendliche Zahlenfolge, die es zu untersuchen gilt.

Auch heute, Jahrzehnte nach den Arbeiten von Cullen und Riesel, gibt es engagierte Menschen, die diesen beiden Aufgaben sehr viel Zeit widmen und immer wieder weitere Zahlenwerte unter die Lupe nehmen. Sie lassen sich nicht dadurch verunsichern, dass die Unendlichkeit durch ihre Anstrengungen kein bisschen geringer wird. Aber man kann sich dem Zauber der Zahlen eben nur schwer entziehen. In der simplen Abfolge der Ziffern steckt bereits ein ganzes Universum voller Fragen.

Die Rubrik der mathematischen Fragestellungen in »The Educational Times« demonstriert das wunderbar. Wer Lust hat, kann sich dort gern einmal umsehen und zum Beispiel die Frage von Professor Schoute beantworten: Er möchte herausfinden, was die unendliche Reihe: $\frac{1}{1} + \frac{1}{2+3} + \frac{1}{4+5+6} + \frac{1}{7+8+9+10} + \dots$ für einen Wert liefert. Auch diese Aufgabe sieht einfach aus. Aber in der Unendlichkeit steckt oft mehr, als man sich denken kann – im wahrsten Sinne des Wortes.



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



FESHKOV / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Tarnkappen für Licht und Schall

»Metamaterialien« ermöglichen maßgeschneiderte Wechselwirkungen, bei denen Wellen mit konventionellen physikalischen Regeln zu brechen scheinen.

Die Stoffe der Wikinger

Lange wurden Wikingertextilien kaum beachtet. Doch sie verraten, wie man sich einst an einen Klimawandel anpasste.



ODIN, THOR & FREYR ODER DREI HELIGESPROCHENE KÖNIGE. WANDTEPPICH VON SKOG. ANONYM (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:THREE_KINGS_OR_THREE_GODS.JPG) / PUBLIC DOMAIN

Arzneien aus dem Ozean

Viele Meereslebewesen produzieren Stoffe, die sich medizinisch nutzen lassen. Jetzt werden die Substanzen auf Anwendungstauglichkeit geprüft – zunehmend mit Erfolg.



DAMOCAN / GETTY IMAGES / ISTOCK

Neue Aussicht in den Kosmos

Bereits die ersten Aufnahmen des James Webb Space Telescope erweitern unser Wissen über ferne Planeten und die frühesten Galaxien.



NASA, ESA, CSA, STSC; IMAGE PROCESSING: JOSEPH DEPASQUALE (STSC), ANTON M. KOENIGER (STSC), ALYSSA PAGAN (STSC) (WEBBTELESCOPE.ORG/CONTENT/MEDIA/IMAGE/2022/01/04/Z08RSGNCRNCTUWRVW)

NEWSLETTER

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

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Jetzt **Spektrum** der Wissenschaft abonnieren
und keine Ausgabe mehr verpassen!



Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination:
12 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder
als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem
von den exklusiven Vorteilen und Angeboten
von **Spektrum PLUS** – wie kostenlosen Downloads,
Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.



Jetzt bestellen:

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: service@spektrum.de

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

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im monatlich kündbaren Abonnement € 0,92 je Ausgabe; ermäßigt sogar nur € 0,69.

Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

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

