

Ausgabe 03 | 2026

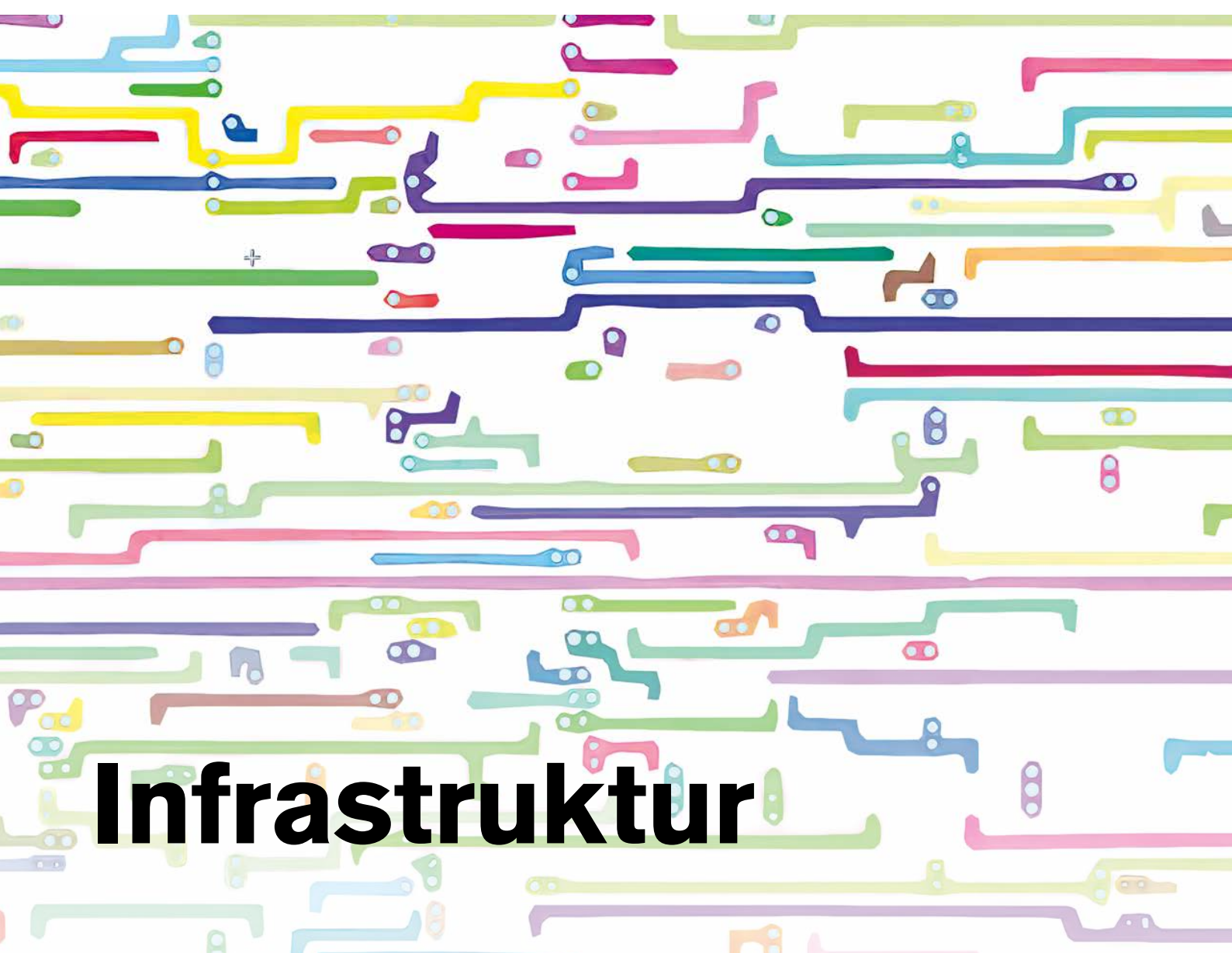
MAX PLANCK

Forschung

VERHALTENS BIOLOGIE
Ein bisschen Frieden

ELEKTROCHEMIE
Geballte Ladung

KUNSTGESCHICHTE
Film-Arbeit



Infrastruktur



Ihre Meinung ist uns wichtig!

Wir möchten erfahren, was Ihnen an der MaxPlanckForschung gefällt und was nicht, und wie wir das Magazin verbessern können. Deshalb laden wir Sie ein, an unserer aktuellen Leserumfrage teilzunehmen.

2x Rolltop-Rucksack
Hajo Mini schwarz

4x Trinkflasche silber

4x Kaffeebecher
mit Gravur

Als Dankeschön
verlosen wir unter
den Teilnehmenden
zehn Preise.



Zur Online-Befragung

www.presseforschung.de/mpg



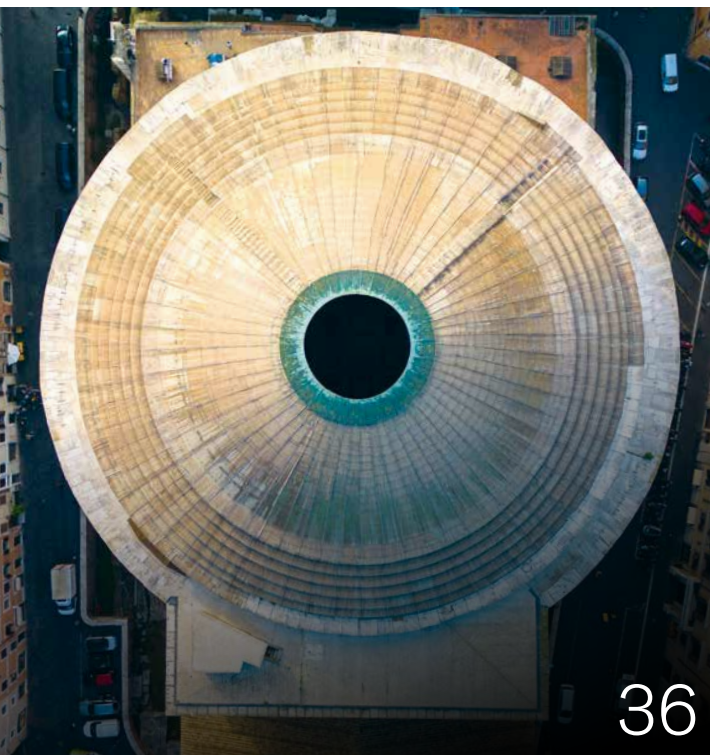
Hauptsache, sie funktioniert – Infrastruktur ist gewöhnlich nur dann ein Thema, wenn sie fehlt, verkommt oder angegriffen wird. Welche meisterhafte Ingenieurleistung aber dahintersteckt, dass wir heute an den meisten Orten telefonieren, gigantische Datenmengen übertragen oder einfach nur Strom mit garantierter Spannung aus der Steckdose ziehen können, interessiert nur Fachleute. Auch die aufwendige Logistik hinter einem engmaschigen Netz an Zugverbindungen wird nur zum Thema, wenn sie mal wieder nicht funktioniert. Die Frage, wie eine Infrastruktur erhalten und geschützt werden kann, bewegt auch andere Industrienationen als Deutschland, nicht zuletzt die USA, wo beispielsweise marode Stromleitungen und notdürftig geflickte Straßen ebenfalls für Aufregung sorgen.

Wir widmen den Fokus dieser Ausgabe der heutigen und künftigen Infrastruktur – nicht nur in Deutschland. Wie auch immer sie gestaltet sein wird, fest steht: Sie darf in Zukunft so gut wie keine CO₂-Emissionen mehr erzeugen, wenn der Sommer 2026 in der Rückschau nicht als ziemlich mild erscheinen soll. Strom aus erneuerbaren Quellen wird daher als zentrale Energieform immer wichtiger. Wie die Stromversorgung hin zu erneuerbaren Quellen sicher, ökonomisch sinnvoll, sozial ausgewogen und klimafreundlich transformiert werden kann, ist Sache politischer Gestaltung. Ein Max-Planck-Forscher untersucht dafür verschiedene Modelle. Eine Schlüsseltechnik der Energiewende sind Batterien, wir stellen den Stand ihrer Forschung und Entwicklung dar. Damit Bauen und Wohnen nachhaltiger werden, kann sogar die Antike Anregungen geben: Wie römischer Beton moderne Baustoffe in puncto Langlebigkeit und CO₂-Bilanz inspirieren könnte, erforscht ein Team von Max Planck und Fraunhofer.

Der Klimawandel wird zunehmend zu einer Bedrohung für unsere Sicherheit, er ist aber längst nicht die einzige. Attacken auf die Infrastruktur gibt es von staatlichen und/oder kriminellen Seiten; oft zielen Angreifer dabei auf die IT-Sicherheit. Sie nutzen dort nicht nur Schwachstellen in der Software, sondern auch in der Hardware aus. Solche Schwachstellen können sogar bewusst eingebaut werden. Ein Max-Planck-Team sucht systematisch nach derartigen Sicherheitslücken.

Forschung schafft auch im Zusammenhang mit der Infrastruktur immer wieder die Basis für zukunftsweisende Neuerungen. In diesem Sinn wünschen wir Ihnen eine Lektüre mit überraschenden Einsichten.

Ihr Redaktionsteam



36



42



58



68

36 | ZEITLOS

Ein spezieller Beton sorgt dafür, dass römische Gebäude wie das Pantheon Jahrtausende überdauern.

42 | FURCHTLOS

Natalia Borrego vom Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie erforscht das Sozialverhalten von Löwen.

58 | EMISSIONSLOS

Für den Erfolg von E-Autos braucht es leistungsfähige Batterien, die wenig Raum einnehmen.

68 | SCHADLOS

Fruchtfliegen helfen zu verstehen, wie sich embryonale Gewebe vor mechanischen Kräften schützen.

BILDER: WIRESTOCK / ADOBE STOCK (LINKS OBEN), STUART DUNN (RECHTS OBEN), ADOBE STOCK (LINKS UNTEN), FRANK VINKEN (RECHTS UNTEN)

INHALT

3 | EDITORIAL

6 | ORTE DER FORSCHUNG

Auf der Zugvogelroute nach Spanien

8 | KURZ NOTIERT

16 | ZUR SACHE

Informationsfreiheit als Garant liberaler Demokratien

22 | INFOGRAFIK

Beste Freunde

IM FOKUS

Infrastruktur

24 | Strom regeln

Europäische Länder fördern die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen unterschiedlich. Wie lässt sich Energiepolitik gerecht gestalten und gleichzeitig die Energiewende voranbringen?

30 | Chips unter Kontrolle?

Heimliche Manipulationen in Hardwarekomponenten lassen sich bisher nur schwer entdecken. Forschende suchen nach Wegen, wie Chips transparenter und sicherer werden können.

36 | Bauen wie die Römer

Römischer Beton ist besonders haltbar und verursacht bei der Herstellung nur wenig CO₂. Heute dient er als Inspirationsquelle, um modernen Beton nachhaltiger zu machen.

42 | BESUCH BEI

Natalia Borrego

48 | VOM PRÄSIDENTEN

Europas Chance in der globalen Wissenschaft

50 | ZWEITER BLICK

WISSEN AUS

52 | Ein bisschen Frieden

Auch bei den ansonsten sanftmütigen Bonobos kommt es manchmal zu Ausbrüchen von Gewalt. Im afrikanischen Regenwald geht ein Forschungsteam der Frage nach, was die Auslöser dafür sind.

58 | Geballte Ladung

Leistungsfähige Batterien sind für die Energiewende unverzichtbar. Forschende versuchen, bestehende Batterietypen zu optimieren, und entwickeln gleichzeitig ganz neue Konzepte.

64 | Film-Arbeit

Ein Forschungsprojekt der Bibliotheca Hertziana zeigt anhand arbeitender Frauen in Filmen, wie sich gesellschaftliche Vorstellungen und Machtverhältnisse auf der Leinwand widerspiegeln.

68 | Mechanik des Lebens

Mechanische Kräfte können die Formgebung während der Embryonalentwicklung empfindlich stören. Zellen in embryonalem Gewebe verfügen daher über Mechanismen, um dies zu verhindern.

74 | POST AUS...

Gunjur, Gambia

76 | NEU ERSCIENEN

78 | FÜNF FRAGEN

Genschere für die Medizin

79 | IMPRESSUM

Ein Vogel? Ein Fahrrad? Ein Flugzeug? Oder doch ein KI-generiertes Bild? Nein, das Foto entstand im Rahmen eines ornithologischen Projekts, das von Gunnar Hartmann, vermittelt über die Bildungsplattform MaxCine am Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie in Konstanz, begleitet wurde. 2026 gewann der Student damit den Fotowettbewerb der Zeitschrift *Nature*. Es zeigt zwei Ornithologen, die in einem Flyke – einem ultraleichten Gleitschirmfahrrad, das von einem Zweitaktmotor angetrieben wird – einen Vogelschwarm eskortieren.

Bei den Vögeln handelt sich um Waldrappe, die im 17. Jahrhundert nahezu ausgerottet wurden. Nur kleine Bestände überlebten, zum Teil in Gefangenschaft. Die geselligen Ibis-Vögel, die mit ihrem kahlen, von einem Kranz langer Federn umgebenen Kopf an freundliche Punks erinnern, hat ein internationales Forschungsprojekt seit 2014 im Alpenraum neu angesiedelt. Ein zentrales Problem dabei war, dass den von Menschen aufgezogenen Tieren die Erfahrung mit dem Zug ins Winterquartier fehlte. Was in der Natur die Vogeleltern vermitteln, übernahmen deshalb die Ornithologen. Das Foto ist Teil der wissenschaftlichen Dokumentation.

Auf dem Bild sieht man die Vögel auf ihrem ersten Flug ins südspanische Andalusien. Der Weg dorthin ist zwar doppelt so lang wie die Strecke in die Toskana, wo die Vögel bislang überwinterten. Die Waldrappe vermeiden dabei aber die Überquerung der Alpen und nehmen eine Route, die sie angesichts sich verändernder Klimabedingungen besser bewältigen können. Mit GPS-Sendern ausgestattet liefern die ausgewilderten Vögel zudem der Online-Datenbank Movebank des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie wichtige Daten.



FOTO: GUNNAR HARTMANN

ORTE DER FORSCHUNG

AUF DER ZUGVOGELROUTE
NACH SPANIEN

7



Sichere Zusammenarbeit

Online-Dokumente, in denen mehrere Personen von unterschiedlichen Rechnern aus arbeiten, können künftig besser geschützt werden. Dienste wie Google Docs, Apple Notes oder Microsoft 365, die gemeinsame Arbeit an Dokumenten ermöglichen, konnten bislang nicht konsequent verschlüsselt werden. Die Inhalte werden zwar verschlüsselt übertragen, müssen für die gemeinsame Bearbeitung auf den Servern der Anbieter jedoch entschlüsselt vorliegen. Ein Team, zu dem auch Forschende des Max-Planck-

Instituts für Sicherheit und Privatsphäre in Bochum gehörten, hat nun einen Weg gefunden, Online-Dokumente durchgängig Ende-zu-Ende zu verschlüsseln, wie es bei Messengerdiensten wie Signal und WhatsApp üblich ist. Die Forschenden erweitern dafür das Verschlüsselungsprotokoll von Signal und ermöglichen nun sicheres gemeinsames Arbeiten an Online-Dokumenten mit Reaktionszeiten von nur 120 Millisekunden.

www.mpg.de/26921714

ausgezeichnet 

SARA WICKSTRÖM

Die Direktorin am Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin in Münster wurde mit dem Körber-Preis für die Europäische Wissenschaft ausgezeichnet, der mit einer Million Euro dotiert ist. Die

Medizinerin und Zellbiologin hat entdeckt, dass sich physische Kräfte wie Druck oder Zug auf die genetische Steuerung auswirken. So können allein durch physische Einwirkung einzelne Gene an- oder ausgeschaltet werden – ein entscheidender Faktor dafür, wie sich eine Zelle entwickelt oder wie Gewebe nach Verletzungen heilt.



FOTO: MARCUS GLOGER / KÖRBER-STIFTUNG

Gründungspreis für Ovo Labs

Das Start-up Ovo Labs hat den Max-Planck-Gründungspreis des Stifterverbandes 2026 erhalten. Die Ausgründung aus dem Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften in Göttingen entwickelt Therapeutika, die die Qualität von Eizellen verbessern und somit den Zeitraum um bis zu fünf Jahre verlängern, in dem die Chancen auf eine Empfängnis hoch sind. Sie haben das Potenzial, die Erfolgsraten einer künstlichen Befruchtung, die derzeit bei nur 30 Prozent liegen, deutlich zu verbessern. Insbesondere bei Frauen über 35 Jahren könnten sich die bishe-

rigen Erfolgsraten möglicherweise beträchtlich erhöhen. Der Max-Planck-Gründungspreis des Stifterverbandes wird seit 2022 alle zwei Jahre an ein erfolgreiches Start-up der Max-Planck-Gesellschaft verliehen und ist mit 30000 Euro dotiert. Er wurde dem Gründungsteam von Ovo Labs – Melina Schuh, Direktorin am Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften, Oleksandr Yagensky und Agata Zielinska – im Rahmen der Jahresversammlung der Max-Planck-Gesellschaft verliehen.

www.mpg.de/26817873

411 Millionen für Proxima Fusion

Für den Demonstrator der Fusionsanlage Alpha ist nun ein finanzieller Grundstock gelegt. Proxima Fusion aus München, eine Ausgründung des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, hat private Investitionen von 411 Millionen Euro eingeworben. Alpha soll Anfang der 2030er-Jahre entstehen und zeigen, dass die Kernfusion nach dem Stellarator-Konzept zentrale technische Anforderungen an ein Kraftwerk erfüllt. Wenn diese Hürde genommen ist, soll mit Stellaris der Prototyp eines Fusionskraftwerks gebaut werden. Die Einwerbung privater Investitionen war Bedingung für eine öffentliche Förderung durch den Freistaat Bayern. Eine weitere Voraussetzung, damit Alpha gebaut werden kann, ist die Finanzierung durch den Bund in Höhe von 1,2 Milliarden Euro, die noch nicht zugesagt ist.

www.mpg.de/26861704

Illustration einer Fusionsanlage nach dem Stellarator-Prinzip. Das Fusionsplasma wird dabei in einem ringförmigen, in sich verdrehten Magnetfeld eingeschlossen.

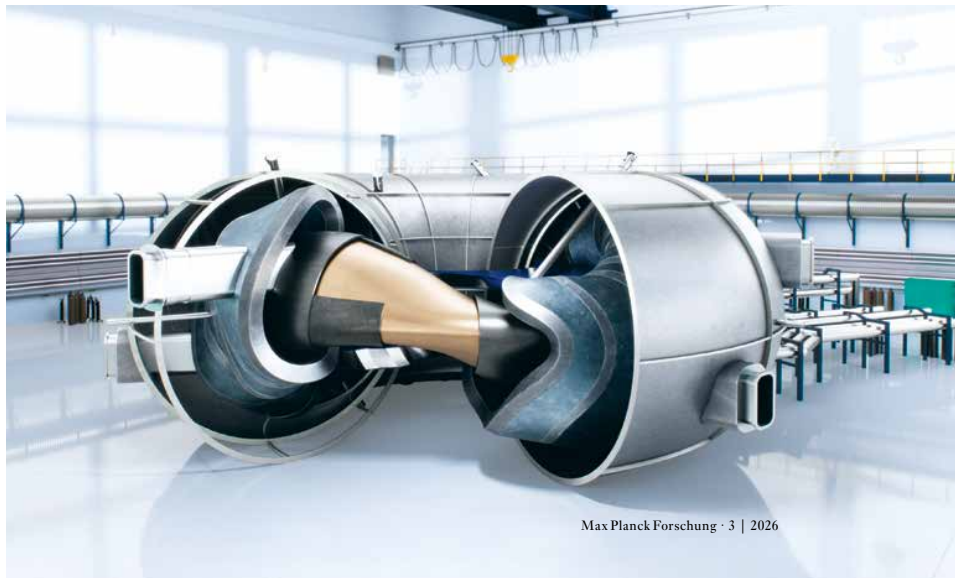


FOTO: PROXIMA FUSION

Europäische Förderung

2026 haben wieder einige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Max-Planck-Gesellschaft Mittel des Europäischen Forschungsrats ERC eingeworben. Acht Forschende bewarben sich erfolgreich um einen ERC Advanced Grant, der jeweils mit 2,5 Millionen Euro für fünf Jahre dotiert ist. Zudem erhalten vier Wissenschaftlerinnen und fünf Wissenschaftler, die am Anfang ihrer Karriere stehen, ERC Starting Grants. Ihre Projekte werden ebenfalls für fünf Jahre mit jeweils 1,5 Millionen Euro gefördert.

www.mpg.de/26838028
www.mpg.de/26957922



FOTO: NASA/SPS

Künstlerische Darstellung des Nancy-Grace-Roman-Weltraumteleskops.

Ein Auge für Exoplaneten

Das Weltraumteleskop Roman der Nasa ist am 30. August ins All gestartet. Es ist nach Nancy Grace Roman, der Architektin des modernen Wissenschaftsprogramms der Nasa, benannt. Das Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg hat zu einem von zwei Instrumenten des Teleskops optomechanische Komponenten bei-

gesteuert. Das Coronagraph Instrument (CGI) soll Bilder von relativ kleinen und kühlen Planeten wie Jupiter ermöglichen, die zudem vergleichsweise nah um ihren Heimatstern kreisen. Zu dem Zweck blendet CGI das Licht des Heimatsterns aus, das das reflektierte Licht des Planeten überstrahlt.

www.mpg.de/26937929



Tröstliche Musik

Musik kann trösten, die Stimmung heben oder Schmerzen erträglicher machen. Das zeigen experimentelle Studien. Doch macht uns alltägliches Musikhören auch psychisch gesünder? Forschende des Max-Planck-Instituts für empirische Ästhetik in Frankfurt am Main werteten Daten von rund 15000 Menschen aus dem schwedischen Zwillingsregister aus; sie verglichen dabei eineiige Zwillinge miteinander, die sich in ihren Musikhörgewohnheiten unterscheiden. Diese Methode aus der Verhaltensgenetik erlaubt es, zwischen genetischem Einfluss und tatsächlicher Wirkung des Musikhörens zu unterscheiden. Das Ergebnis: Wenn Menschen selbst entscheiden, wann und wie viel Musik sie hören, sind diejenigen, die mehr Musik hören, psychisch nicht gesünder. Depressive, ängstliche, neurotische oder einsame Menschen nutzten Musik allerdings häufiger, um ihre Stimmung zu regulieren. Die positiven Effekte gezielten Musikhörens aus experimentellen Studien zur Musiktherapie lassen sich also nicht ohne Weiteres auf alltägliche Hörgewohnheiten übertragen.

www.mpg.de/26945115



FOTO: ADOBESTOCK

10

Erwachsene Träger der Neandertaler-Variante des Rezeptors für ein Wachstumshormon haben im Schnitt rund 270 Gramm mehr Muskelmasse.

Mehr Muckis

Neandertaler waren nach heutigem Wissen zwar nicht die tumben Kraftprotze, für die man sie lange gehalten hat. Kräftiger gebaut als die meisten heute lebenden Menschen waren sie aber durchaus. Reguliert wird das Wachstum von Muskeln und Knochen vom Wachstumshormon aus der Hirnanhangsdrüse. Das Hormon bindet an einen Rezeptor auf der Zelloberfläche, der daraufhin ein Signal ins Zellinnere weiterleitet. Ein internationales Forschungsteam, darunter Forschende des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, hat herausgefunden, dass die Neandertaler-Version dieses Rezeptors zwei Abweichungen von der beim modernen Menschen häufigsten Variante aufweist. Im Labor gezüchtete Zellen mit dem Neandertaler-Rezeptor vermehren sich um 40 Prozent schneller als Zellen mit dem bei

uns Menschen häufigeren Rezeptor. Allerdings tritt die Neandertaler-Version auch beim modernen Menschen auf: *Homo sapiens* hat diese Rezeptorvariante vor rund 47000 Jahren durch Vermischung mit Neandertalern geerbt. Menschen mit der Neandertaler-Variante besitzen im Durchschnitt rund 270 Gramm mehr Muskelmasse. Heute ist diese Variante vor allem in Süd- und Ostasien verbreitet. In manchen südasiatischen Bevölkerungsgruppen tragen bis zu 24 Prozent der Menschen sie in sich, verglichen mit rund 0,5 Prozent der Europäer. Den Grund für die unterschiedliche Häufigkeit kennen die Forschenden noch nicht. www.mpg.de/26899208

Das tut gut!

Naturerlebnisse helfen auch dann, wenn man vorher gar kein Problem hatte. Bekannt ist seit Längerem, dass sich Menschen, die sich gestresst und erschöpft fühlen, bei einem Spaziergang im Park oder Wald entspannen und erholen. Doch auch Menschen, denen es gut geht, profitieren messbar von einem Ausflug ins Grüne. Forscherinnen des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung in Berlin haben 54 Studien analysiert, die größtenteils die Naturwirkung auf gestresste und erschöpfte Menschen untersuchen. Einige wenige Arbeiten untersuchten aber auch den Effekt auf Menschen ohne Belastung. Demnach heben Naturerfahrungen auch deren Stimmung und verbessern ihre geistige Leistungsfähigkeit. Nun wollen die Forscherinnen untersuchen, ob die Menschen auf diese Weise widerstandsfähiger gegenüber Belastungen werden.

www.mpg.de/26890379

Misshandelte Kinder
leiden oft ihr Leben
lang unter ihrem
Trauma. In Zeichnun-
gen drücken Betroffene
ihre Ängste aus.



BILD: MPI FÜR PSYCHIATRIE

Hemmstoff gegen Trauma

Forschende vom Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München haben an Mäusen mögliche Auswirkungen von Traumata im Kindesalter auf das Sozialverhalten untersucht. Demnach entwickeln männliche Mäuse anhaltende Defizite im sozialen Verhalten, wenn sie als Jungtiere in einer für sie stressigen Umgebung leben mussten. Im Jugend- und Erwachsenenalter neigen diese Männchen dann dazu, sich unterzuordnen und sich in niedrige soziale Ränge drängen zu lassen. Die Forschenden analysierten zudem die Aktivität von Genen im Gehirn der Mäuse und stellten fest, dass der Stress die Genregulation in Gehirnregionen durcheinanderbringt, die Gefühle und das Belohnungssystem steuern. Bei Mäusebabys normalisieren sich diese Veränderungen und die Verhaltensauffälligkeiten wieder, wenn ihnen ein Hemmstoff des Proteins FKBP51 verabreicht wird. FKBP51 spielt auch beim Menschen eine wichtige Rolle bei der Regulierung von Stresshormonen und steht in Zusammenhang mit der Entwicklung psychischer Erkrankungen. Ob der Hemmstoff auch die Folgen von weit zurückliegenden Traumata nachträglich wieder rückgängig machen und ob sich die Ergebnisse auf den Menschen übertragen lassen, ist noch unklar.

www.mpg.de/26860499

11

Macher und Zauderer

Der Tanganjikasee in Ostafrika ist ein Experimentallabor der Evolution. In relativ kurzer Zeit sind hier Tausende von Fischarten entstanden, die jeweils eigene ökologische Nischen besetzen. Forschende des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie in Konstanz haben untersucht, wie zwei nahe verwandte Arten, der Uferbuntbarsch und der Große Fadenmaulbrüter, Entscheidungen treffen. Die Männchen beider Arten bauen aufwendige, an einen Vulkan erinnernde Sandnester, um Weibchen anzulocken. Fällt ein Fremdkörper in das Nest, entfernen ihn die Männchen augenblicklich. Experimente, in denen die Forschenden künstliche Gegenstände in den Nestern platzierten, zeigten, dass beide Arten dieselben Abneigungen besaßen und beispielsweise größere und auffällig gefärbte Objekte am

schnellsten entfernten. Im nächsten Schritt erschwerten die Wissenschaftler die Entscheidungen und zwangen die Fische, verschiedene Merkmale gegeneinander abzuwägen. So war ein Objekt beispielsweise unauffällig gefärbt, dafür aber größer. In diesem Fall verhielten sich die Fische unterschiedlich: Der Große Fadenmaulbrüter traf weiterhin schnelle, entschlossene Entscheidungen auf Basis eines einzigen Objektmerkmals. Der Uferbuntbarsch dagegen berücksichtigte mehrere Merkmale und benötigte deshalb länger für eine Entscheidung. Keine der beiden Vorgehensweisen ist dabei per se besser oder schlechter. Offenbar hilft die jeweilige Entscheidungsfindung den Arten in ihrer ökologischen Nische. Warum dies so ist, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

www.mpg.de/26918166



FOTO: MAÉLAN TOMASEK / MPI FÜR VERHALTENSBIOLOGIE

Ein Uferbuntbarsch (links) und ein Großer Fadenmaulbrüter entfernen als Erstes die Schneckenhäuser aus ihren Sandnestern, die sie am stärksten stören.

Riecht nach Blume, ist aber Käfer

Ölkäfer besitzen einen ungewöhnlichen Lebenszyklus: Ihre Larven klammern sich an Wildbienen fest und lassen sich von den solitär lebenden Tieren in deren Brutkammern transportieren. Dort können sie sich vom Ei der Biene und den Nahrungsvorräten für den Bienennachwuchs ernähren. Honigbienen schaden die Käfer dagegen nicht, die Arbeiterinnen im Stock entfernen die Larven bei der Brutpflege. Um Wildbienen anzulocken, ahmen die Larven einer Ölkäferart aus Nordamerika deren Sexuallockstoffe nach. Der in Europa vorkommende Schwarzblaue Ölkäfer imitiert dagegen den Duft von Blüten, wie Forschende des Max-Planck-

Instituts für chemische Ökologie in Jena entdeckt haben. Er ist damit der erste bekannte Fall eines Tieres, das mittels selbst produzierter Duftstoffe Pflanzen imitiert. Chemische Untersuchungen haben ergeben, dass die Larven über ein Dutzend verschiedene Blütenaromen freisetzen, etwa die von Pflaumen- und Kirschblüten, die zur selben Zeit blühen, in der die kleinen Käferlarven auf den Bientransport warten. Mit dem Blütenduft lockt der Schwarzblaue Ölkäfer unterschiedliche Bienenarten an – anders als sein amerikanischer Verwandter, der mit seinem Sexuallockstoff nur eine Art betören kann.

www.mpg.de/26863007



FOTO: DANNY KESSLER / MPI FÜR CHEMISCHE ÖKOLOGIE

Ein von Forschenden mit den Lockstoffen von Ölkäferlarven beträufeltes Wattestäbchen hat eine Weidensandbiene angezogen. Die Duftstoffe der Larven gaukeln der Biene eine Blüte vor.

12

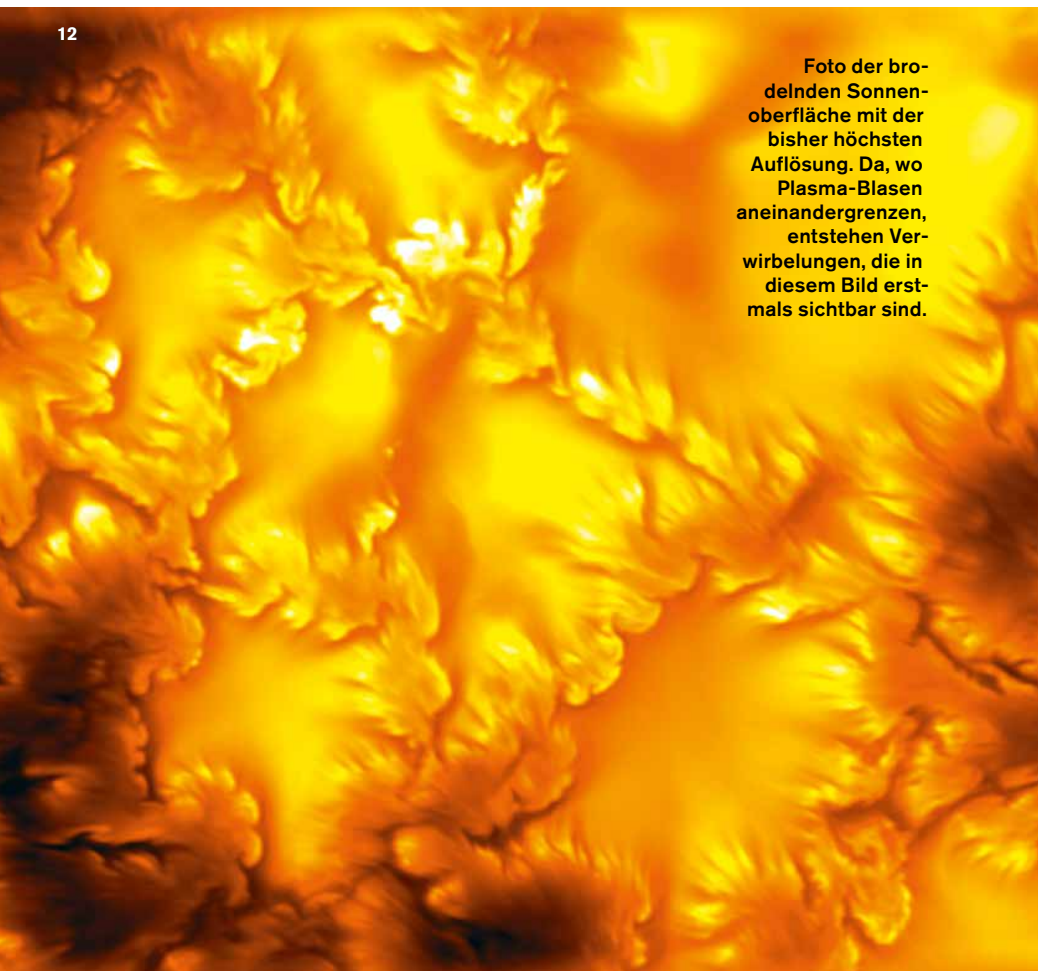


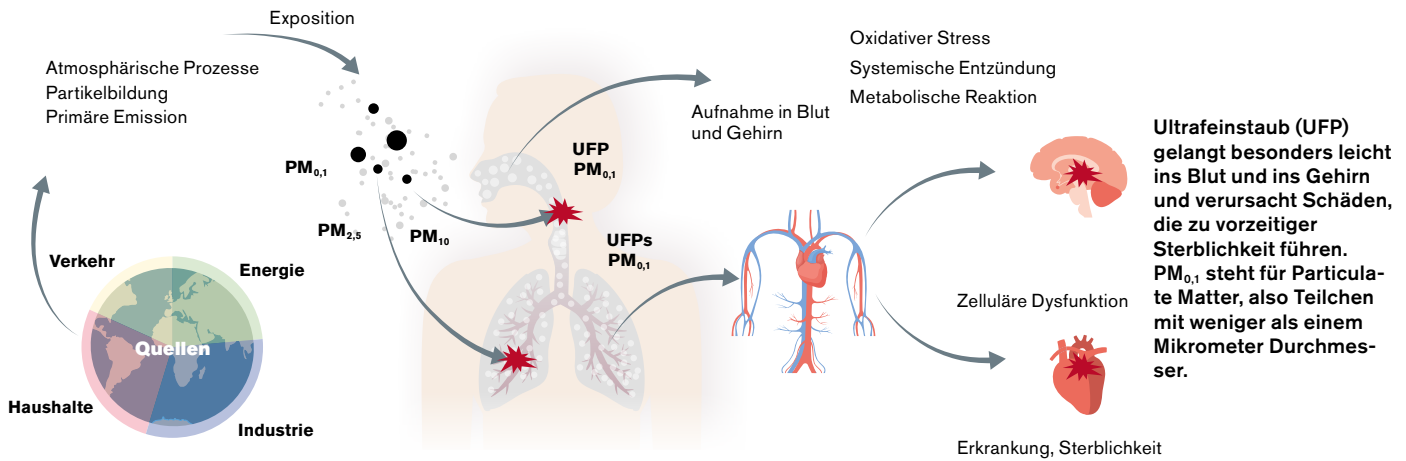
Foto der brodelnden Sonnenoberfläche mit der bisher höchsten Auflösung. Da, wo Plasma-Blasen aneinandergrenzen, entstehen Verwirbelungen, die in diesem Bild erstmals sichtbar sind.

Die Sonne ganz nah

Die Sonnenoberfläche hat eine blasenartige Struktur, sogenannte Granulen, die an Blasen kochenden Wassers erinnern. Sie messen zwischen 500 und 2000 Kilometern im Durchmesser und entstehen, wenn Sonnenplasma aufsteigt, abkühlt und wieder absinkt. Nun hat ein Team, dem auch Forschende des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung in Göttingen angehören, mit dem weltgrößten Sonnenteleskop auf Hawaii und fortgeschrittener Analysetechnik eine Bildauflösung erreicht, mit der eine 1-Euro-Münze in 180 Kilometer Entfernung erkennbar wäre. Sie machten damit Strukturen an den Grenzen zwischen den Blasen auf der Sonne sichtbar, die bisher nur Computermodele vorhergesagt hatten. Es handelt sich um kleinste Wirbel, die entstehen, wenn zwei Fluide mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aneinander vorbeiströmen. Da das Sonnenplasma auch Magnetfelder mit sich führt, helfen die neuesten Bilder auch zu verstehen, wie sich dort Feldlinien verdrillen und sich die so angestaute Energie in Sonnenstürmen explosionsartig entlädt.

www.mpg.de/26900309

FOTO: NSF/NSO/AURA/MPG



Massenmonster in junger Galaxie

Manche schwarzen Löcher bringen es auf Millionen bis Milliarden Sonnenmassen. Wie sie so schwer wurden, ist aber noch nicht völlig verstanden. Eine Beobachtung der Galaxie J0148-4214 mit dem James-Webb-Weltraumteleskop könnte bei der Klärung helfen. Ein Team unter der Leitung des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik in Garching hat diese Galaxie so eingefangen, wie sie nur 1,2 Milliarden Jahre nach dem Urknall aussah. Heute ist das Universum 13,8 Milliarden Jahre alt. Das Erstaunliche: Die Bilder deuten darauf hin, dass es in der Galaxie drei schwarze Löcher gab, die bis etwa 80 Millionen Sonnenmassen schwer waren. Offenbar verschmolzen Galaxien, die schwarze Löcher enthielten, schon sehr früh in der Geschichte des Universums miteinander. Es entstanden Galaxien, in denen sich zwei oder gar drei schwarze Löcher umkreisen und schlussendlich miteinander verschmolzen. So könnten schwarze Löcher schnell genug gewachsen sein, um zu erklären, warum immer wieder Exemplare im noch jungen Universum entdeckt werden, die bereits milliardenmal schwerer sind als die Sonne.

www.mpg.de/26898787

Tödlicher Ultrafeinstaub

Feinstaub, dessen Partikel kleiner als 100 Nanometer sind, verursacht jährlich weltweit zwischen knapp einer und vier Millionen vorzeitige Todesfälle. Das hat ein internationales Team unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz und des Cyprus Institute in Nikosia gezeigt. Demnach sind etwa die Hälfte der im Mittel zwei Millionen vorzeitigen Todesfälle durch Ultrafeinstaub auf Herz-Kreislauf-Erkrankungen zurückzuführen. Anders als für Feinstaub mit größeren Partikeln gibt es für Ultrafeinstaub, der leicht in den Körper eindringt und deshalb besonders gefährlich ist, in der EU und den USA keine Grenzwerte. Wie die Studie auch zeigt, könnte ein Grenzwert von 5000 Partikeln pro Kubikzentimeter im Jahresmittel die weltweite Übersterblichkeit durch Ultrafeinstaub um fast die Hälfte senken.

www.mpg.de/26869475

Wirkungsloses Verbot

Ein Social-Media-Verbot für Jugendliche bleibt offenbar ziemlich wirkungslos. Das zeigt ein internationales Team, an dem das Max-Planck-Institut für Verhaltensökonomik beteiligt war, mit einer Untersuchung in Australien. Dort dürfen unter 16-Jährige seit Dezember 2025 keine eigenen Konten mehr bei großen Plattformen wie TikTok, Instagram oder Snapchat besitzen. Daran hielten sich im Juni aber nur noch sechs Prozent von 800 befragten Jugendlichen. Damit sank die Zahl derer, die das Verbot befolgten, sogar noch seit April, als sich noch gut ein Viertel daran hielt. Die Jugendlichen gaben an, dass sie das Verbot mit einem falschen Geburtsdatum, einer Verbin-

dung via VPN außerhalb Australiens oder den Konten anderer Familienmitglieder umgehen. Einem Fünftel der Befragten halfen dabei Geschwister, Eltern oder andere Erwachsene. Warum sie die Regelung nicht beachteten, begründeten die Jugendlichen mit sozialen Argumenten: Sie fürchteten, in ihrem Freundeskreis den Anschluss zu verlieren. Damit ein Social-Media-Verbot sein Ziel erreichen kann, bräuchte es den Autorinnen und Autoren der Studie zufolge unter anderem wirksamere technische Lösungen, umfangreiche Aufklärung, Vorbilder und alternative Freizeitangebote etwa durch Sport, Musik oder Jugendzentren.

www.mpg.de/26878819

Brieftauben orientieren sich mithilfe des Erdmagnetfelds, des Sonnenstands sowie markanter Objekte und Gerüche.



FOTO: CHRISTIAN ZIEGLER / MPI FÜR VERHALTENSBIOLOGIE

Schneller zu grünem Stahl

Die Produktion von klimafreundlichem Stahl wird reif für die Praxis. Wie ein Team des Max-Planck-Instituts für Nachhaltige Materialien in Düsseldorf gezeigt hat, wandelt Wasserstoff Eisenerz doppelt so schnell und bei niedrigerer Temperatur in Eisen um als bisher, wenn die Forschenden Nickeloxide zusetzen. Eisen mit Wasserstoff statt Kohle zu produzieren, senkt die CO₂-Emissionen der Stahlproduktion erheblich. Der Prozess verlief allerdings bislang vergleichsweise langsam. Bei der Umsetzung mit Nickeloxiden entsteht eine Legierung aus Eisen und Nickel, aus der sich nickelhaltige Edelstähle herstellen lassen. www.mpg.de/26790435

14

Immer der Leber nach

Zugvögel orientieren sich auf ihren manchmal Tausende Kilometer langen Flügen unter anderem am Magnetfeld der Erde. Bislang vermutete man, dass die Tiere das Magnetfeld mit speziellen Zellen im Auge oder im Schnabel wahrnehmen. Forschende, unter anderem des Max-Planck-Instituts für Verhaltensforschung in Konstanz, haben nun diese und andere Organe von Tauben darauf getestet, ob sie magnetische Eisenverbindungen enthalten. Von allen untersuchten Geweben wies die Leber die höchste Konzentration von Eisenoxid auf. Vor allem eine Art von Immunzellen, sogenannte Makrophagen, beinhalten

winzige Eisenoxid-Partikel, mit denen sie das Magnetfeld der Erde wahrnehmen könnten. Die Zellen nehmen es aus roten Blutkörperchen auf, die sie in der Leber abbauen. Nervenverbindungen könnten die Signale über das Erdmagnetfeld ins Gehirn leiten. Verhaltenstests ergaben, dass Brieftauben ohne Makrophagen an bewölkten Tagen nicht nach Hause finden. Bei klarem Himmel orientierten sie sich dagegen am Stand der Sonne. Die Ergebnisse legen also nahe, dass die Vögel das Erdmagnetfeld mithilfe der eisenreichen Immunzellen in ihrer Leber wahrnehmen.

www.mpg.de/26514353

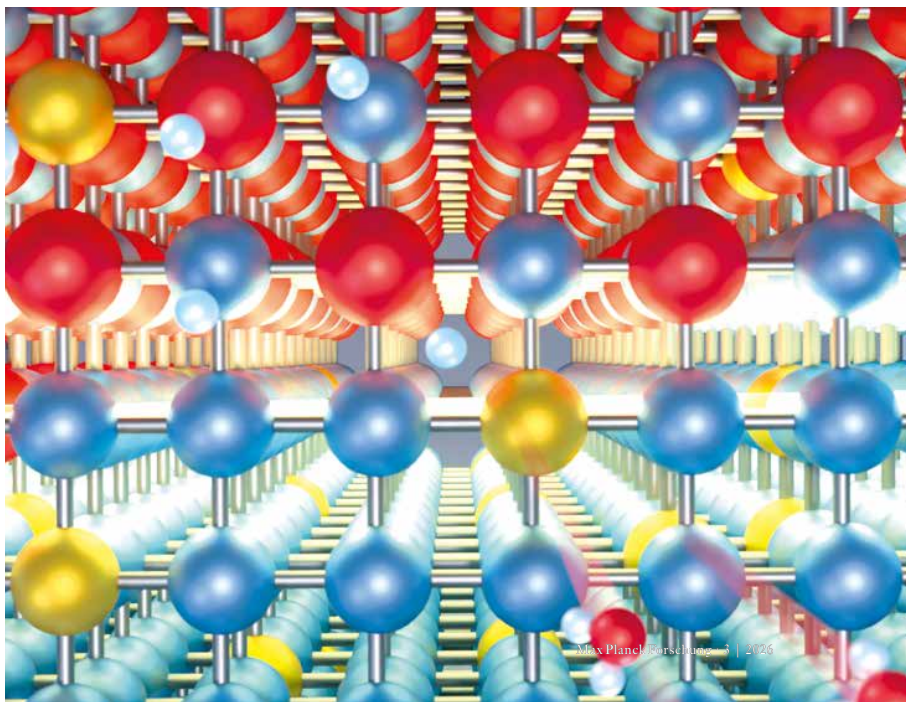


BILD: XINREN CHEN / MPI FÜR NACHHALTIGE MATERIALIEN

An der Grenze der Stahlgewinnung: Das Bild zeigt vereinfacht, wie Wasserstoff (weiß) Eisenoxid (grau=Eisen, rot=Sauerstoff) reduziert, und deutet die Katalyse durch Nickel (gelb) an.

Prävention versus Behandlung

Ein Herzinfarkt verlief um 1900 meist tödlich, heute ist er gut behandelbar. Doch der medizinische Fortschritt wirkt unterschiedlich: Während Herzinfarkte, Schlaganfälle und Hüftfrakturen seltener werden, steigt die Zahl der Krebserkrankungen. Das zeigt eine Studie des Max-Planck-Instituts für demografische Forschung in Rostock und des Karolinska-Instituts in Stockholm anhand von Gesundheitsdaten aus Schweden, wo bereits früh ein Schwerpunkt auf Krankheitsprävention gelegt wurde. Bei 75-jährigen Frauen etwa halbierte sich von einer Geburtskohorte 1920 bis zur Kohorte 1940 die Herzinfarkttrate binnen 20 Jahren, der Überlebensanteil im ersten Jahr stieg von 51 auf 75 Prozent. Auch bei Schlaganfällen und Hüftfrakturen sank die Zahl der Neuerkrankungen stärker, als die Überlebenschancen stiegen – ein Hinweis darauf, dass Vorbeugung hier mehr bewirkt hat als Behandlung. Bei Krebs ist es anders: Es gibt mehr Neuerkrankungen, aber dank besserer Diagnostik und Therapie überleben mehr Menschen.

www.mpg.de/26901908

Die Emergence Timescale gibt an, in welcher Zeitspanne sich der menschliche Fingerabdruck in den natürlichen Klimaschwankungen nachweisen ließ. In den schraffierten Regionen reicht der beobachtete Zeitraum für diesen Nachweis nicht.

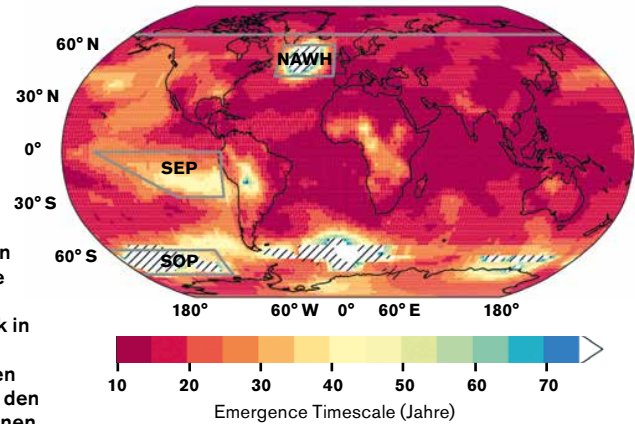


BILD: MPG NACH CC BY 4.0 ARU ET AL. 2026, DOI: 10.1126/SCIADV.AED1506

Regionaler Klimawandel

Auf globaler Ebene ist die Sache klar: Der menschliche Einfluss vor allem durch CO₂-Emissionen auf die weltweite Durchschnittstemperatur lässt sich eindeutig berechnen. Nun hat ein Team des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg die Methoden, die Nobelpreisträger Klaus Hasselmann an diesem Institut entwickelt hat, auf das Klima verschiedener Regionen ange-

wendet. So haben die Forschenden den menschlichen Fingerabdruck auch im Klima der meisten Weltgegenden wie etwa Europa oder der Arktis nachgewiesen. Sie haben die Spur des Menschen aber auch im Klima des Südostpazifiks entdeckt, wo der Zusammenhang bislang nicht klar zu belegen war.

www.mpg.de/26923155

15

Auf der Schleimspur

Schneckenschleim ist ein vielseitiges Biomaterial. Die Bänderschnecke *Cepaea nemoralis*, die häufigste Schnecke Europas, etwa produziert fünf unterschiedliche Schleimarten: als Schmiermittel für die Fortbewegung, als Klebstoff zum Festhalten, als schützenden Verschluss für ihr Schneckenhaus und zwei Schleime zur Verteidigung. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Pots-

dam hat auf dem Gelände des Instituts Bänderschnecken gesammelt und deren Schleim analysiert. Demnach verwenden die Schnecken in allen Schleimarten die gleichen Komponenten, vor allem Kollagen VI, ein Protein, das in der Haut und in den Knochen von Wirbeltieren vorkommt, sowie Calcium. Calcium dient dabei zum einen der Vernetzung und zum anderen in mineralischer Form der Verstärkung des Materials. Die Ei-

Die gewöhnliche Bänderschnecke produziert mit nur wenigen molekularen Bausteinen verschiedene Schleimarten.



genschaften des Schleims passen die Schnecken dem jeweiligen Zweck an, indem sie die Gesamtmenge an Protein sowie den Anteil von Kollagen VI und Calcium variieren. Nach dem Vorbild des Schnecken-schleims könnten sich etwa Wundkleber für die Medizin entwickeln lassen.

www.mpg.de/26899778

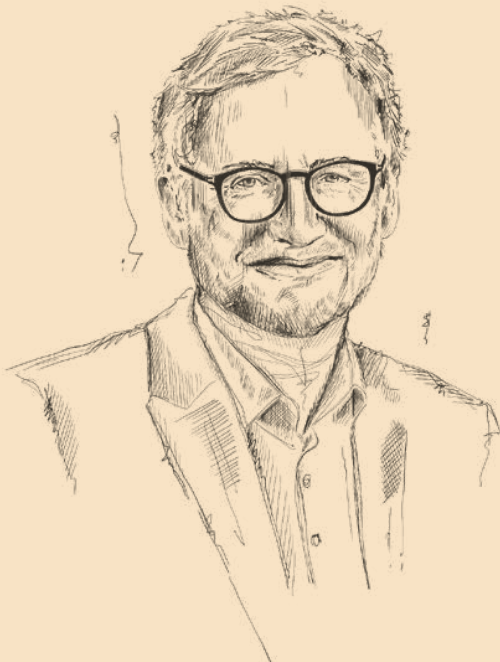
ZUR SACHE

Carolyn Moser

16 leitet am Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht die Forschungsgruppe Ensure – European Security Revisited. Sie ist Spezialistin für das Recht und die Governance von Sicherheit und Verteidigung in Europa. Ihre Forschungsgruppe beschäftigt sich aus juristischer und politikwissenschaftlicher Perspektive mit den tiefgreifenden Umbrüchen und Neuerungen in der europäischen Sicherheit. Dabei geht es unter anderem um die Frage, wie nationale und internationale Akteure handlungsfähig bleiben, ohne Governance-Standards zu vernachlässigen.



ILLUSTRATIONEN: SOPHIE KETTERER FÜR MPG



Ralph Hertwig

ist Direktor des Forschungsbereichs Adaptive Rationalität am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin. Er forscht zu Modellen der begrenzten, ökologischen Rationalität, erfahrungsbasierten Entscheidungen, evidenzbasierten Interventionen zur Steigerung von Entscheidungs- und Selbstkontrollkompetenzen (Boosting), zur Psychologie des Risikos, Entwicklung von Entscheidungsprozessen über die Lebensspanne sowie zum Zusammenhang zwischen digitalen Medien und Demokratie.

Erik Tuchtfeld

beschäftigt sich am Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht mit der Regulierung des digitalen öffentlichen Raums, insbesondere sozialer Plattformen. Seine Forschungsschwerpunkte sind Meinungsfreiheit und der Schutz der Privatsphäre. Er leitet die humanet3-Gruppe, ein interdisziplinäres Forschungsprojekt dreier Max-Planck-Institute, die sich mit den Möglichkeiten einer gemeinwohlorientierten, menschenzentrierten digitalen Transformation auseinandersetzt.

Informationsfreiheit als Garant liberaler Demokratien

17

Der Koalitionsausschuss der Bundesregierung hat Anfang Juli beschlossen, das Informationsfreiheitsgesetz (IFG) grundlegend zu reformieren. Die angekündigten Veränderungen beschränken die Auskunftsrechte von Bürgerinnen und Bürgern gegenüber Bundesinstitutionen weitgehend. Das Autorenteam führt aus, dass dies einer Abschaffung der Informationsfreiheit nahekommt und sich dadurch die im europäischen und internationalen Vergleich bereits jetzt defizitäre Rechtslage in Deutschland weiter verschlechtert.

Das IFG begründet in Deutschland seit dem 1. Januar 2006 einen generellen Informationsanspruch gegenüber Bundesbehörden, die nur in – allerdings recht umfangreichen – Ausnahmefällen eine Auskunft verweigern dürfen. Auf Landesebene regeln weitere Gesetze die Informationsansprüche gegenüber Landesbehörden (und in Teilen auch Kommunen). Diese Regelwerke unterscheiden sich jedoch stark. Während Hamburg und Schleswig-Holstein als vorbildlich gelten, haben Bayern und Niedersachsen bis heute kein entsprechendes Gesetz. Die rechtlichen Transparenzmechanismen sollen öffentliche Behörden unabhängig von der jeweiligen Regierung zur Offenlegung von Informationen verpflichten, potenzielle Verbindungen zu Sonderinteressen aufdecken und so die öffentliche Kontrolle von Entscheidungsprozessen ermöglichen und Korruption möglichst unterbinden oder aufdecken. Die Corona-Masken-Affäre oder Hintergründe zum Einfluss von Lobbyisten auf die Bundespolitik zum Beispiel wären ohne IFG-Anträge nicht ans Licht gekommen.

→

Die in den verschiedenen Informationsfreiheits- oder Transparenzgesetzen in Deutschland normierten Auskunftsansprüche befähigen Bürgerinnen und Bürger zur demokratischen Teilhabe und beschränken gleichzeitig potenziellen Machtmissbrauch politischer und administrativer Akteure. Transparenz gilt daher als Kennzeichen moderner demokratischer Regierungsführung.

Bereits jetzt kann der Informationsanspruch verweigert werden

Den Umfang der gesetzlich gewährleisteten Transparenz staatlichen Handelns auf Bundesebene möchte die amtierende Koalition nun erheblich einschränken. So soll zum einen die Notwendigkeit eines „berechtigten Interesses“ für ein Auskunftsverlangen eingeführt werden. Als Regelfall müssten Bundesbehörden dann – wie im vergangenen Jahrhundert – keine Informationen veröffentlichen, es sei denn, Bürgerinnen und Bürger argumentieren überzeugend, dass sie ausnahmsweise Anspruch auf Auskunft haben. Dabei war es eben diese Umkehr der Darlegungslast, die im Rahmen der Einführung des IFG vor rund 20 Jahren als besondere demokratische

Errungenschaft gefeiert wurde und in einem außergewöhnlichen Verfahren von den Regierungsfractionen im Bundestag gegen den Widerstand der eigenen Regierung durchgesetzt wurde.

Auskunftsrechte sollen zudem „künftig auf natürliche Personen fokussier[t]“ werden, insbesondere „in Deutschland lebende Deutsche und Unionsbürger“. Recherchen des MDR haben darüber hinaus Pläne des Bundesinnenministeriums aufgedeckt, nach denen die IFG-Auskunftsrechte von Journalistinnen und Journalisten sowie Abgeordneten eingeschränkt werden sollen. Die bisher bestehende Kostendeckelung von 500 Euro pro Anfrage soll aufgehoben werden. Die Hemmschwelle, eine Auskunft zu erfragen, dürfte dadurch vor allem für Privatpersonen steigen, da sich dann gar nicht mehr abschätzen lässt, wie teuer eine Anfrage werden kann. Das Bundeswirtschaftsministerium etwa hat dem Recherchenetzwerk Correctiv ein paar Dutzend Seiten des Schriftverkehrs der Energiebranche an das Ministerium bereitgestellt und die tatsächlichen Kosten dafür auf 2100 Euro beziffert. Ferner soll durch Identifikationspflichten für die antragstellenden Personen die Arbeit von Portalen wie FragDenStaat verunmöglicht werden. FragDenStaat hat bei der Durchsetzung des Rechtsanspruchs auf Auskunftserteilung erhebliche Bedeutung erlangt. So haben nach Angaben des Portals 130 000 Menschen bereits über 250 000 Anfragen über die Plattform gestellt.

Begründet werden die geplanten Einschränkungen primär mit der „komplexen Bedrohungslage von innen und von außen“. Doch bereits jetzt kann der Informationsanspruch verweigert werden, wenn sich zum Beispiel das Bekanntwerden der Informationen nachteilig auf internationale Beziehungen oder Belange der inneren oder äußeren Sicherheit auswirken kann. Darüber hinaus sind auch behördliche Entscheidungsprozesse, personenbezogene Daten, geistiges Eigentum und Betriebs- oder

Geschäftsgeheimnisse besonders geschützt. In Anbetracht der aktuell bestehenden vielfältigen Ausnahmetatbestände ist die Begründung der Gesetzesänderung als Maßnahme zum Schutz der öffentlichen Sicherheit kaum nachvollziehbar.

Nicht nur innerhalb Deutschlands, wo der Bund in Sachen Informationsfreiheit nach Einschätzung der Open Knowledge Foundation nur im Mittelfeld liegt, sondern auch im internationalen Vergleich schneidet das IFG schon jetzt nicht gut ab. Im weltweiten Rating der Informationsfreiheit des kanadischen Centre for Law and Democracy und der spanischen NGO Access Info Europe belegt Deutschland Platz 129 von 142 erfassten Staaten. Deutschland nimmt damit unter allen EU-Staaten den letzten Rang ein.

In der Europäischen Union (EU) selbst hat die Informationsfreiheit Verfassungsrang. So betont Artikel 1 (!) des EU-Vertrags (EUV), dass Entscheidungen „offen und möglichst bürgernah“ getroffen werden müssen (wiederholt auch in Artikel 10 EUV). Artikel 15 des Vertrags über die Arbeitsweise der EU operationalisiert dieses allgemeine Prinzip und hält fest, dass „[j]eder Unionsbürger sowie jede natürliche oder juristische Person mit Wohnsitz oder satzungsgemäßem Sitz in einem Mitgliedstaat [...] das Recht auf Zugang zu Dokumenten der Organe, Einrichtungen und sonstigen Stellen der Union“ hat. Grundrechtlich verbürgt auch Artikel 42 der EU-Grundrechtecharta (GRC) das Recht auf Zugang zu Dokumenten, verstärkt wird es auch durch das Grundrecht auf gute Verwaltung (Artikel 41 GRC).

Eine Demokratie erfordert Rechenschaftspflicht

Der Zusammenhang von guter Regierungsführung und Transparenz geht zurück auf die Entstehung moderner Demokratien. Im Jahr 1791, nur wenige Monate nach der französischen Revolution, schrieb der britische Politiker und Vordenker Thomas Paine, dass nur solche Entscheidungsträger vertrauenswürdig seien, die auch Rechenschaft ablegen müssten. Was aus heutiger Sicht ein zentraler Pfeiler moderner Demokratien ist, war damals ein fundamentaler Bruch mit den politischen und institutionellen Verhältnissen der Erbmonarchie. Voraussetzung für das Einfordern von Rechenschaft ist jedoch Kenntnis über den Zeitpunkt und die Urheberschaft von Entscheidungen. Auf den Punkt gebracht hat das Barack Obama im Jahr 2009 in einem Memorandum an Bundesbehörden zur Auslegung des US-amerikanischen Informationsfreiheitsgesetzes (Freedom of Information Act): Eine Demokratie erfordert Rechenschaftspflicht, und Rechenschaftspflicht erfordert Transparenz.

Demokratien sind zudem in besonderer Weise auf das Vertrauen der Bürgerinnen und Bürger angewiesen. Ihre Legitimität – anders als bei autoritären Systemen, die auf Zwang und Kontrolle setzen können – beruht wesentlich auf der freiwilligen Zustimmung der Regierten. Vertrauen in staatliche Institutionen bringt viele Vorteile für Staat und Gesellschaft mit sich: Es senkt Durchsetzungskosten, stabilisiert das System

19



in Krisenzeiten, ermöglicht kollektives Handeln und schützt vor politischer Entfremdung und demokratiefeindlichen Alternativen. Vertrauen kann jedoch nicht erzwungen werden. Es muss durch verschiedene Mechanismen – etwa Rechenschaftspflichten und faire Verfahren – verdient werden. Die im Auftrag der Körber-Stiftung erhobene Studie „Demokratie in der Krise 2025“ liefert jedoch erschütternde Zahlen für Deutschland: Das Vertrauen der Wahlberechtigten in die Demokratie sowie in öffentliche Einrichtungen und Institutionen ist im Sinkflug.

Die Rolle von Transparenz, die unter anderem durch Auskunftsrechte hergestellt wird, ist dabei durchaus komplex und widersprüchlich. Eine Meta-Analyse aus dem Jahr 2023 hat versucht, dieses uneinheitliche Bild durch eine Synthese von insgesamt 49 Studien aufzuklären. Laut dieser Meta-Analyse ist Regierungstransparenz im Durchschnitt mit einem Anstieg des Bürgervertrauens in die Regierung verbunden, auch wenn der Anstieg nur leicht ist. Auch die Art und Weise der Transparenzvermittlung spielt eine große Rolle. Nutzen Regierungen Websites und soziale Medien, um das innere Funktionieren öffentlicher Institutionen nachvollziehbarer zu machen, erhöht diese Form der Transparenz das Vertrauen nicht zwangsläufig.

Transparenz ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für Vertrauen. Ihr Erfolg hängt von verschiedenen Faktoren ab – etwa der Zugänglichkeit, Verständlichkeit und Ehrlichkeit des Offengelegten. Die empirischen Ergebnisse sind wenig überraschend: Wer Bürgerinnen und Bürgern einen Blick in die staatliche Wurstküche gewährt, darf sich nicht wundern, wenn ein wenig appetitlicher Herstellungsprozess von Gesetzen kein großes Vertrauen einflößt. Inhalt und Ergebnis einer Politik scheinen zudem wichtiger und wirksamer als Transparenz zu sein, um Vertrauen zu erzeugen. Allerdings sollte nach demokratischen Maßstäben in Reaktion hierauf nicht die Transparenz über das Verfahren eingeschränkt werden, sondern die „Herstellung“ von Gesetzen so verbessert werden, dass die Regierten der Regierung nicht trotz, sondern wegen der Kenntnis des Verfahrens vertrauen.

Auch die Wissenschaft ist auf das IFG angewiesen

Die kontroverse öffentliche Diskussion über die geplanten Änderungen des Informationsfreiheitsgesetzes konzentriert sich bislang vor allem auf deren absehbare Folgen für Journalismus und Zivilgesellschaft. Weitgehend unbeachtet bleibt dagegen die Bedeutung des bestehenden Gesetzes für die unabhängige Forschung. Auch die Wissenschaft ist auf den Zugang zu amtlichen Informationen angewiesen, um staatliches Handeln beobachten, empirisch untersuchen und kritisch beurteilen zu können. Die geplanten Änderungen würden diese Möglichkeit erheblich einschränken. Dies lässt sich konkret illustrieren.

Eine Reform des IFG sollte die tatsächlichen Defizite adressieren

Zum einen geht es um Informationen, die auf den ersten Blick keiner Einschränkung unterliegen. Dies betrifft unter anderem Budgetfragen. Wenn beispielsweise Gelder aus dem Bundeshaushalt für gewisse Vorhaben ausgegeben werden, kann über das IFG ein Antrag gestellt werden, der es Forschenden erlaubt, die Mittelzuteilung und -verwendung besser zu verstehen. Eine wirtschaftswissenschaftliche Studie, die aufgrund ihrer Brisanz bundesweit in den Medien präsent war, wies nach, dass die Wahlkreise von Bundestagsabgeordneten, die dem Haushaltsausschuss angehören, durchschnittlich doppelt so viele Fördergelder erhalten. Der besagten Studie lagen (unter anderem) Daten zugrunde, die dank eines IFG-Antrages erlangt worden waren. In einer anderen Arbeit, dieses Mal aus der Rechtswissenschaft, wurde aufgezeigt, wo und wie deutsche Mittlerorganisationen im Ausland Demokratie- und Protestbewegungen mit öffentlichen Mitteln finanziell unterstützen.

Zum anderen geht es um Informationen, die (potenziell) Einschränkungen unterliegen. Die angestrebte Reform des IFG sieht auch vor, Ausnahmen zu öffentlichen Dokumenten aus Sicherheitsgründen auszuweiten. Selbst wenn Antragstellende ein berechtigtes Interesse vorweisen könnten, könnte ihnen der Zugang zu Informationen aufgrund von Sicherheitsbedenken verwehrt bleiben. Ausnahmen dieser Art werden oft weit ausgelegt und auch auf nicht klassifizierte Dokumente mit rein bürokratischem Inhalt angewandt, wie Einblicke in die EU-Praxis zeigen.

21

Darüber hinaus hätte die Einschränkung des Antragsrechts auf Deutsche und Unionsbürger und -bürgerinnen erhebliche Nachteile für international ausgerichtete Wissenschaftsorganisationen, was sachlich nur schwer gerechtfertigt werden kann. Insbesondere Forschung zu grenzüberschreitenden Phänomenen wie moderne Formen der Korruption, aber auch vergleichende Studien beispielsweise zu staatlichem Machtmissbrauch und dem Anstieg des Autoritarismus leben stark von länderübergreifenden, komparativen Elementen. Hierbei muss das Land, mit dem sich eine Wissenschaftlerin oder ein Wissenschaftler auseinandersetzt, keinesfalls zwangsläufig dem Land der jeweiligen Staatsangehörigkeit entsprechen.

Eine Reform des IFG sollte die seit seinem Inkrafttreten zutage getretenen Defizite adressieren – etwa die weitreichenden Möglichkeiten, Auskunftsanträge zu verweigern – und auf eine weitere Öffnung der Verwaltung hinwirken, um demokratische Kontrolle zu stärken und Vertrauen zu erhöhen. Dies gilt umso mehr, wenn diese Öffnung zugleich mit einer Verbesserung der behördlichen und politischen Entscheidungsprozesse einhergeht. Dies ergibt nicht zuletzt verwaltungsökonomisch Sinn: Wenn staatliche Institutionen in strukturierten Prozessen die ihnen zur Verfügung stehenden Informationen proaktiv veröffentlichen und so Transparenz herstellen, sinkt die Notwendigkeit von aufwendigen Anfragen erheblich.



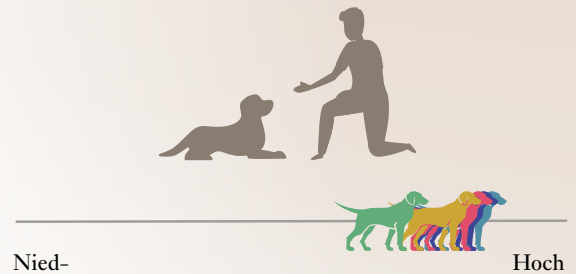
INFOGRAFIK

Beste Freunde

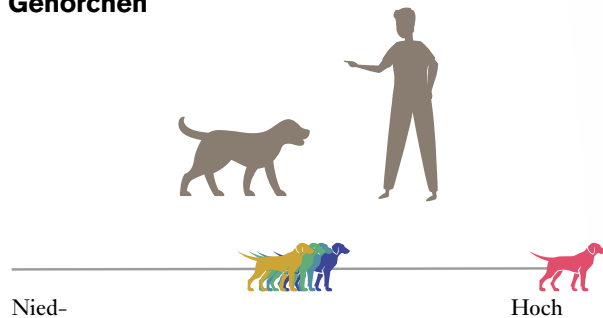
In vielen westlichen Gesellschaften gilt der Hund als „der beste Freund des Menschen“. Forschende des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig haben herausgefunden, dass die Vierbeiner auch in anderen Kulturen hoch geschätzt werden: Menschen spielen zum Beispiel mit ihnen, fühlen sich von ihnen beschützt und betrauern ihren Tod. Eine besonders enge Beziehung pflegen Menschen weltweit zu Jagdhunden. Die Unterstützung bei der Jagd ist in vielen Kulturen eine zentrale Aufgabe von Hunden. Sie hat vermutlich eine wichtige Rolle bei der Domestizierung der Tiere gespielt.



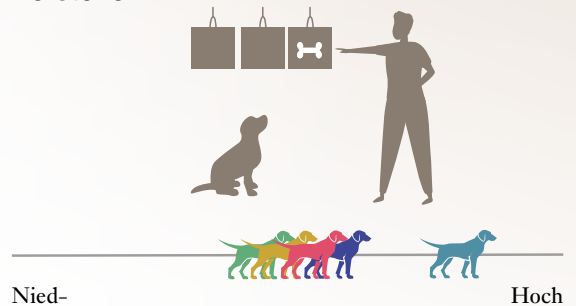
Stärke der Beziehung



Gehorchen

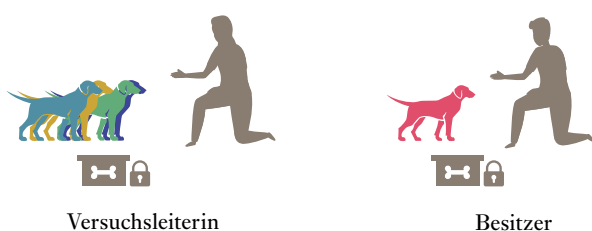


Verstehen

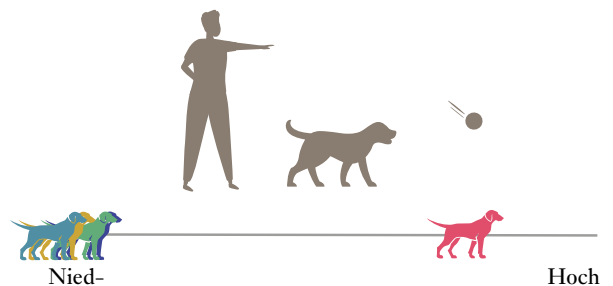


Verhaltenstests verraten, wie stark die Beziehungen zwischen Menschen und Hunden aus Deutschland, Madagaskar, Peru, der Mongolei und dem Inselstaat Vanuatu sind und wie gut sie miteinander kommunizieren können. In vielen Tests schneiden Tiere aus den verschiedenen Kulturen ähnlich ab. Unterschiede beruhen meist auf unterschiedlichen Anforderungen, die an Hunde im täglichen Leben gestellt werden. So können Menschen aus Vanuatu Hinweise ihrer Hunde am besten verstehen, und Hunde aus Deutschland folgen Anweisungen schneller als die Tiere aus den anderen Kulturen. Wenn es gilt, eine unlösbare Aufgabe zu bewältigen, wenden sich die Hunde aus den nicht westlichen Gesellschaften hilfesuchend an die Versuchsleiterin, Hunde aus Deutschland dagegen an ihren Besitzer. Ein unbekannter Gegenstand animiert besonders Hunde aus Deutschland zum Spielen – vermutlich weil Hunde in nicht westlichen Gesellschaften Spielzeug nicht kennen.

Hilfe holen



Spiele





Peru

Madagaskar



Mongolei



Vanuatu



Aufgaben

- Jagd
- ✕ Herdenschutz
- ⊕ Wachen
- Hüten
- ◇ Transport

Anzahl an Aufgaben

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4

Die Analyse von über 120 Kulturen weltweit zeigt, dass Hunde in vielen Gesellschaften mehrere Aufgaben übernehmen. Je mehr Funktionen die Tiere in einer Kultur haben, desto wahrscheinlicher ist es, dass sie gefüttert, im Haus gehalten oder medizinisch behandelt werden. Jagdhunde besitzen weltweit einen besonders hohen Stellenwert.

23



Jagdhunde werden häufig wie eine

„Bello“

haben einen Namen



man redet mit ihnen



werden im Todesfall
betrüert und begraben



Juliane Bräuer
*Hunde der Welt – Forschungsreisen
zu Hund und Mensch*
Springer Verlag 2026, 246 Seiten

Infrastruktur

24 | Strom regeln

30 | Chips unter Kontrolle

36 | Bauen wie die Römer

24



Früher Braunkohle, heute Erneuerbare: Auf ehemaligen Tagebauflächen bei Klettwitz in der Lausitz stehen heute Windräder und Solaranlagen. Der Ausbau erneuerbarer Energien ist in Deutschland weit vorangeschritten – doch die Frage, wie die Kosten der Energiewende verteilt werden, ist weiterhin umstritten.

FOTO: PICTURE ALLIANCE / ANDREAS FRANKE

Strom regeln

Text:
Caspar Dohmen

25



Weg von fossilen hin zu erneuerbaren Energien: An diesem Ziel richteten in den 1990er-Jahren einige europäische Regierungen ihre Energiepolitik aus – und gingen dabei politisch unterschiedlich vor. Seither passten sie die Regelungen immer wieder an, in Deutschland stehen gerade wieder Neuerungen an. Die Auswirkungen der Energiepolitik untersucht Max Willems vom Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung in Köln. Ihn interessiert: Wer zahlt für die Energiewende – und ist das eigentlich gerecht?

Eine Abkehr von fossiler Energie ist aus vielen Gründen geboten: Das Angebot hängt vom Wohlwollen oft zweifelhafter Handelspartner ab, Kriege und Krisen treiben ihren Preis nach oben, und dann ist da natürlich der Klimawandel. Die Voraussetzungen für die Energiewende sind in Europa jedoch sehr unterschiedlich. Während Schweden dank Wasserkraft und Kernenergie schon früh einen vergleichsweise CO₂-armen Strommix hatte, setzte Deutschland länger auf fossile Energieträger wie Braunkohle und importiertes Gas. Trotzdem spielte die Bundesrepublik eine zentrale Rolle für die Energiewende: Ende 1990 verabschiedete der Bundestag das Stromerzeugungsgesetz, das weltweit als erstes Gesetz seiner Art

gilt. Strom aus Wind- und Solarenergie erzeugten damals vor allem kleinere, unabhängige Anbieter, denen etablierte Energieversorger häufig den Zugang zu ihren Netzen verweigerten. Nachdem die schwarz-gelbe Bundesregierung mit dem neuen Gesetz die Versorger verpflichtete, Strom aus erneuerbaren Energien abzunehmen und zu vergüten, kam es zu einem ersten kleinen Boom bei Windkraftanlagen.

Erzeugung erneuerbarer Energien vorrangig an ihr Netz anzuschließen. Zudem garantierte es Produzenten erneuerbarer Energie für einen Mindestzeitraum eine Einspeisevergütung. Das bewirkte einen Schub für die Energiewende, weil es Ökostromproduzenten oft erst die Finanzierung entsprechender Anlagen ermöglichte. Neue Anbieter brauchte es damals, weil die kapitalkräftigen Stromkonzerne RWE oder E.on vergleichsweise wenig in

„Die Industrie trat gleichzeitig aufs Gas- und Bremspedal.“

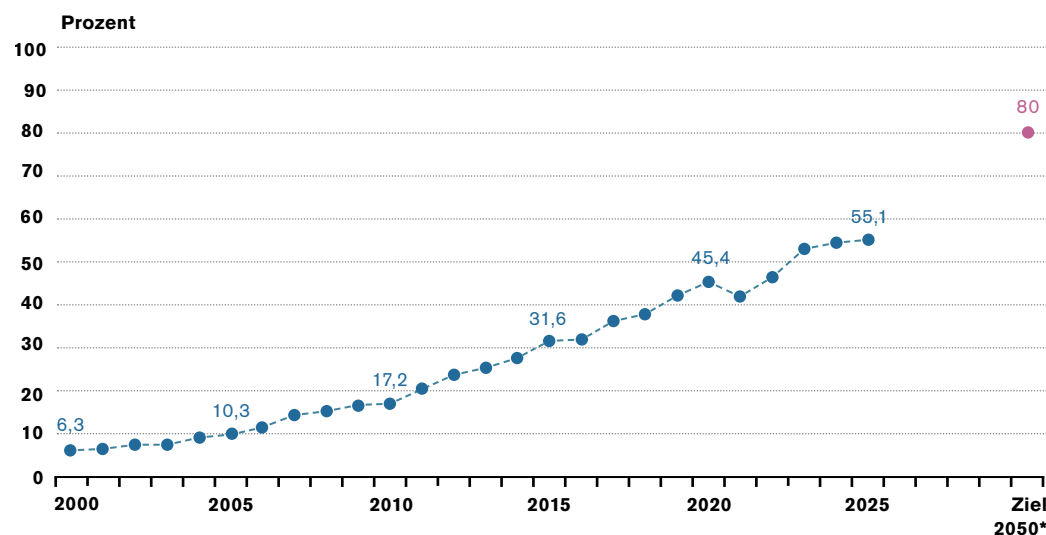
Max Willems

Neun Jahre später brachte die rot-grüne Bundesregierung die Energiewende entscheidend voran: Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) trat 2000 in Kraft. Es verpflichtete Netzbetreiber, Anlagen zur

Wind und Sonne investierten. Bereitwillige Akteure wie etwa Energiegenossenschaften, Stadtwerke oder private Haushalte waren meist kapitalschwach. Mit der garantierten Einspeisevergütung nahm

26

Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch



* Quelle Zielwert 2030: Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2023

Quelle Umweltbundesamt (UBA) auf Basis UBA, AGEE-Stat „Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland“ (Stand 02/2026)

Nach der Verabschiedung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2000 stieg der Anteil des Stroms aus erneuerbaren Quellen wie Sonne und Wind deutlich an.

der Staat ihnen einen erheblichen Teil des Marktrisikos ab, die Folgen volatiler Strompreise. Fachleute sprechen von „De-Risking“. „Diese gesetzliche Maßnahme war von zentraler Bedeutung für die Energiewende in Deutschland“, sagt Max Willems, der sich vor seiner Promotion bei Lucio Baccaro, Direktor am Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, zunächst als Strommarktanalyst mit langfristigen Prognosen für das Energiesystem beschäftigte.

Mit dieser Sicherheit im Rücken installierten viele Bürgerinnen und Bürger entsprechende Anlagen. Mancherorts gründeten sie Energiegenossenschaften und bauten gemeinsam dezentrale Energieanlagen. Es gab einen regelrechten Gründungsboom: Von 2008 bis 2013 stieg die Zahl der Bürgerenergiegenossenschaften in Deutschland von 24 auf 718 an. Nach den EEG-Novellen von 2014 und 2017 stagnierte deren Anzahl, da sich die Förderbedingungen für kleinere und alternative Investoren verschlechterten und größere Wettbewerber begünstigt wurden. Seit 2021 zieht sie wieder langsam an.

Mit dem Ausbau stellte sich jedoch zunehmend die Frage, wer die Kosten der Förderung tragen sollte. Die deutsche Industrie hatte die Energiewende grundsätzlich befürwortet. Gerade Technologieunternehmen versprachen sich davon einen neuen Absatzmarkt. Gleichzeitig habe die Industrie aber verhindern wollen, dass ihre eigenen Kosten für die Stromnutzung infolge der Energiewende stiegen, sagt Willems. „Die Industrie trat damit gewissermaßen gleichzeitig auf das Gas- und Bremspedal.“ Und sie fand Gehör. „Sowohl die deutsche als auch die schwedische Regierung entschieden sich aus Sorge vor Wettbewerbsnachteilen für die heimische Industrie dafür, die Förderkosten zu Gunsten großer Verbraucher und zu Lasten der Privathaushalte zu verteilen“, sagt der Politikökonom.

„Finanziert wurde die garantierte Einspeisevergütung durch eine Strompreismulage, die im Wesentlichen private Haushalte zahlten“, sagt er und verweist auf gravierende Kostenunterschiede zwischen beiden Gruppen. So zahlten private Haushalte in Deutschland von 2008 bis 2019 zeitweise doppelt so viel für Strom wie die Industrie, in Schweden phasenweise sogar ungefähr dreimal so

viel. Willems sieht in der Energiewende „einen großen Umverteilungsmechanismus“ – und in der Quersubventionierung der Industrie einen „Verteilungskompromiss“ darüber, wer die damit verbundenen Kosten tragen soll.

Auf den Punkt gebracht

Garantierte Einspeisevergütungen haben den Ausbau erneuerbarer Energien in Ländern wie Deutschland und Spanien beschleunigt. Sie machten Investitionen kalkulierbarer und erleichterten neuen Akteuren den Markteintritt.

Das Merit-Order-Prinzip stößt mit dem Ausbau erneuerbarer Energien jedoch an Grenzen. Weil das teuerste noch benötigte Kraftwerk den Strompreis bestimmt, können zeitweise hohe Gewinne für günstigere Anbieter entstehen. Gleichzeitig können Phasen niedriger Börsenpreise die Investitionsanreize für erneuerbare Energien schwächen.

Für eine Reform der Strompreisbildung gibt es verschiedene Vorschläge, die Strompreise stärker von den Gaspreisen entkoppeln und Investitionen in erneuerbare Energien kalkulierbarer machen sollen. Zugleich gibt es erste Ansätze, die Kosten der Energiewende gerechter zu verteilen.

Um soziale Verwerfungen abzufedern, kompensierte die rot-grüne Koalition in Deutschland bereits 1999 Belastungen privater Haushalte an anderer Stelle. So senkte sie die Beiträge in die Rentenversicherung, wovon gerade Haushalte mit niedrigeren Einkommen profitierten. Aber anders als einkommensstärkere Haushalte können diese sich Investitionen in Solaranlagen und Heimspeicher, aber auch Elektroautos oder Ladestationen trotz staatlicher Förderung häufig nicht leisten. „Nicht zufällig befürworten in Meinungsumfragen wohlhabende Menschen die Energiewende in höherem Maß als Menschen aus unteren sozialen Schichten“, schreibt Jens Beckert, ebenfalls Direktor am Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, in seinem Buch *Verkaufte Zukunft*.

Europäische Länder ohne dominante Industriestruktur entschieden sich für ein anderes Politikdesign. „Spanien setzte zwar ebenso wie Deutschland auf eine garantierte Einspeisevergütung, verzichtete aber auf eine nennenswerte Quersubventionierung der eigenen Industrie“, sagt Willems. Großbritannien setzte wie Schweden stärker auf den Markt, subventionierte aber wie Spanien die Industrie beim Strompreis kaum. „So blieben die Energiepreise für die britische Industrie vergleichsweise hoch – und Kritiker sehen darin einen Faktor, der zur anhaltenden Deindustrialisierung des Landes beigetragen hat“, so Willems.

Vor allem die garantierte Einspeisevergütung habe Schwung in die Energiewende gebracht. „Sie wäre nicht so schnell angefallen, hätten sich Staaten wie Deutschland und Spanien nicht dafür entschieden“, sagt Willems und verweist auf Großbritannien. Ohne Einspeisevergütung seien erneuerbaren Energien dort anfangs vergleichsweise langsam ausgebaut worden.

Sinkende Kosten 27

Mit dem Fortschreiten der Energiewende änderten sich die Voraussetzungen: Technologische Fortschritte und die Massenfertigung von Anlagen ließen die Kosten für Photovoltaik-Anlagen und Windräder drastisch sinken. Nun geschah, was der SPD-Politiker und Architekt der Energiewende Hermann Scheer einst erwartet hatte: Die Preise purzelten. So hatte zum Start der Energiewende die Erzeugung – im Fachjargon Gesteherung – einer Kilowattstunde Solarstrom in Deutschland noch umgerechnet etwa 100 Cent gekostet, rund zehnmal so viel wie die gleiche Menge Strom aus Kohle oder Atomspaltung. Mittlerweile sind die Kosten für Solarstrom hierzulande auf fünf Cent gesunken und betragen in sonnenreichen Ländern wie Spanien sogar nur noch einen Cent.

Mehr als 100 Länder kopierten die Grundprinzipien des EEG, einschließlich China. Weltweit entstand eine Industrie für Solar- und Windstrom. 2025 lösten die erneuerbaren Energien global Kohle als größte Quelle der Stromproduktion ab. Laut den Prognosen der Internationalen Energieagentur wird alleine der Anteil von Wind-



energie und Photovoltaik an der weltweiten Stromerzeugung bis 2028 bei 25 Prozent liegen – und damit die Wasserkraft mit einem prognostizierten Anteil von rund 14 Prozent übertreffen. In Deutschland kam 2023 erstmals mehr als die Hälfte des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen. Trotzdem dürfte Deutschland seine selbst gesteckten Ziele verfehlen. Ende 2025 lag die Stromerzeugung von Erneuerbare-Energien-Anlagen laut Bundesumweltamt bei 290 Terawattstunden. Um 2030 wie politisch gewollt vier Fünftel des Stroms aus erneuerbaren Quellen herzustellen, müsste die Produktion innerhalb von drei Jahren auf 600 Terawattstunden steigen. Das dürfte unrealistisch sein.

In der Energiekrise 2022/23 leerten sich unterirdische Gasspeicher wie hier im niedersächsischen Rehden schnell, wodurch auch die Strompreise stiegen. Griechenland scheiterte damals aber mit seinen Reformvorschlägen für die Preisbildung auf dem europäischen Strommarkt.



FOTO: PICTURE ALLIANCE/DPA | HAUKE-CHRISTIAN DITTRICH

Die EU-Kommission sah das Instrument der garantierten Einspeisevergütung kritisch und votierte mit Blick auf Wettbewerb und Innovationen für marktbasierende Ansätze. Vor Gericht ging es zudem um die Frage, ob der Staat einen Teil der Belastung privaten Energieunternehmen auferlegen durfte. Laut einem Urteil des Europäischen Gerichtshofs ist eine Umlage der Einspeisevergütung über den Strompreis mit europäischem Wettbewerbsrecht vereinbar. Nach der Finanzkrise 2008 wuchs jedoch der politische Druck, die Kosten der Energiewende zu begrenzen. Regierungen setzten deshalb stärker auf den Wettbewerb. Damit waren Stromproduzenten jedoch auch stärker den schwankenden Preisen am Spotmarkt ausgesetzt. Wie hoch der Strompreis dort ausfällt, bestimmt das sogenannte Merit-Order-Prinzip. Für Willems ist es der „Nukleus des europäischen Strombepreisungssystems“.

für Produzenten einen Anreiz, mehr Strom bereitzustellen, während Konsumenten angehalten sind, ihren Verbrauch zu senken. Der Strompreis richtet sich dabei nach den Kosten des teuersten Kraftwerks, das gerade noch benötigt wird, um den Strombedarf zu decken. Das sind inzwischen oft flexible Gaskraftwerke, die aber gerade bei hohen Gaspreisen wie seit dem Ukrainekrieg sehr teuer produzieren. Den Preis, den ein solches teures Grenz-

müssen sie aus diesen Erlösen auch ihre vergleichsweise hohen Investitionskosten finanzieren. Zugleich gibt es Marktkonstellationen, die die Anreize für Investitionen in Erneuerbare-Energie-Anlagen senken. So produzieren Solaranlagen mittags besonders viel Strom, sodass das Stromangebot stark steigt. Dann wird ein billigeres Grenzkraftwerk benötigt, weswegen wiederum der Börsenpreis für Strom sinkt. Damit sinken ausgerechnet dann die Erlöse der Solaranlagen, wenn sie besonders viel Strom produzieren. Für Willems zeigt sich darin bei einem hohen Anteil erneuerbarer Energien eine „Dysfunktionalität eines Marktsystems, das Stromproduktion ausschließlich auf Basis von marginalen Produktionskosten vergütet“. Speicher, eine flexiblere Stromnachfrage und der Ausbau der Netze können solche Schwankungen zwar abfedern. Ob sie die zunehmende Volatilität der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien vollständig ausgleichen können, ist Willems zufolge jedoch unsicher.

„Die Strompreismulage zahlten im Wesentlichen private Haushalte.“

Max Willems

Das Merit-Order-Prinzip folgt dem Knappheitsprinzip und soll so zu einer sicheren Stromversorgung beitragen: Ist die Nachfrage hoch und das Angebot knapp, steigt der Strompreis. Das schafft

kraftwerk vorgibt, erhalten alle Stromproduzenten. Davon profitieren insbesondere Betreiber von Erneuerbare-Energien-Anlagen, deren laufende Produktionskosten niedrig sind. Allerdings

Aber ließen sich die geltende Preisfindung für Strom reformieren und die negativen Effekte abmildern oder gar vermeiden?



Zwei Ansätze werden diskutiert: Nach einem Vorschlag sollte die Politik den Strommarkt aufteilen, in einen für Strom aus fossilen und einen anderen für erneuerbare Energien. Auf dem fossilen Markt könnte das Merit-Order-Prinzip beibehalten werden, das ursprünglich für den Handel von Strom aus fossiler Energie entwickelt wurde. Auf dem zweiten Markt für Strom aus erneuerbarer Energie würden die Preise künftig kostenorientiert und langfristig vertraglich vereinbart.

Verschiedene Reformvorschläge

In der Energiekrise 2022/23 brachte die griechische Regierung dieses Modell für die EU ins Spiel. Endkunden sollten demnach einen Strompreis zahlen, der sich aus einem gewichteten Durchschnitt beider Marktpreise ergeben würde. So wollte Griechenland Dreierlei erreichen: die starke Kopplung der Strompreise an den Gaspreis beseitigen, Verbraucher vor sehr stark schwankenden Strompreisen schützen und die Anreize für Investitionen in

Erneuerbare-Energie-Anlagen erhöhen, indem langfristige Erlöse kalkulierbarer werden. In gewisser Weise sollte damit ein ähnlicher Effekt greifen wie durch die garantierte Einspeisevergütung zu Beginn der Energiewende. Spanien griff bei einem eigenen Vorschlag viele Elemente des griechischen Konzepts auf. Frankreich unterstützte die Idee ebenfalls. Dagegen warnten unter anderem Deutschland, Dänemark und die Niederlande vor einer Zerschlagung des integrierten Strommarktes – aus Sorge, diese könnte regulatorische Unsicherheit schaffen und damit die Investitionsbereitschaft privater Akteure schwächen. Die EU ließ den Mechanismus grundsätzlich unangetastet.

Ein zweiter Reformvorschlag wird vor allem im angelsächsischen Raum debattiert: das sogenannte Single-Buyer-Modell. Demnach soll ein staatlicher Regulierer über langfristige Verträge den gesamten produzierten Strom aufkaufen und über den Absatzmarkt an die Nutzer weiterverkaufen. „So würden die Strom- von den Gaspreisen abgekoppelt und Übergewinne vermieden“, sagt Willems. Aber er erwartet keine politische Mehrheit für diesen „vergleichsweise weitgehenden Ansatz in der EU“. Gleichzeitig sieht er politischen Handlungsbedarf gegen steigende Strompreise, zumal die Bürgerinnen und Bürger weitere steigende Kosten für die Transformation schultern müssen, etwa für Mobilität oder Gebäude.

Erste Ansätze, die Lasten der Energiewende anders zu verteilen, gibt es in EU-Ländern. Das soll auch dazu beitragen, dass die Transformation zu erneuerbaren Energien insgesamt gelingt. Willems begrüßt, dass die Bundesregierung 2022 alle Zahlungen der EEG-Umlage im Bundeshaushalt verankert hat. Damit zahlten für die Energiewende nun die Steuerzahler und nicht mehr die Stromkunden, was einen Unterschied mache. Denn anders als das Strompreissystem ist das Steuersystem progressiv gestaltet: Für Besserverdienende gelten höhere Steuersätze. Die Politik könnte auch ein Klimageld an ärmere Haushalte auszahlen oder günstigere Stromtarife für sie vorgeben. So macht es Spanien mit seinem Sozialstromtarif, dem „Bono Social“, der einen Rabatt auf den Strompreis gewährt. „Allerdings profitiert davon bislang nur ein geringer Teil der Bevölkerung“, sagt Willems. Um mit dem Instrument die

Situation Ärmterer in größerem Ausmaß zu verbessern, müsste der Rabatt für extrem Bedürftige höher ausfallen, und deutlich mehr Haushalte müssten ihn erhalten.

Bremse für Erneuerbare

In Deutschland bereitet die aktuelle Bundesregierung wieder Reformen vor, um die Strompreise von Industrie und Privathaushalten zu senken. Zum einen hat sie den Industriestrompreis eingeführt, der Strom für die energieintensive Industrie auf einen fixen Preis heruntersubventionieren soll. Zum anderen will sie die Einspeisevergütung für neu installierte private Solaranlagen ab 2027 schrittweise abschaffen. Zudem sollen private Erzeuger Solarstrom aus neu installierten Anlagen künftig direkt vermarkten. „Dadurch wird es für Privathaushalte komplizierter und unattraktiver, Solaranlagen zu betreiben, was zu weniger Installationen führen dürfte“, sagt Max Willems. „Auch das sogenannte Netzpaket dürfte den Ausbau erneuerbarer Energien verlangsamen.“ Es sieht vor, dass die Erzeuger von Windstrom einen größeren Teil der Kosten, die durch die Abregelung von Kraftwerken entstehen und durch den verzögerten Netzausbau verursacht werden, übernehmen müssen.

Strommarkt und -preise bleiben auch in anderen Ländern auf der Tagesordnung. In Großbritannien kündigte der neue englische Premierminister Andy Burnham im Sommer 2026 als eine seiner ersten Maßnahmen an, die Mehrwertsteuer für Strom ab Oktober zunächst abzuschaffen. Das würde einen Haushalt im Schnitt allerdings nur um 45 Pfund jährlich entlasten. Wie es in Großbritannien weitergeht, wird Willems bald vor Ort erleben, denn er wechselt im Herbst als Postdoktorand an das Environmental Change Institute der Universität Oxford.



www.mpg.de/podcasts/infrastruktur

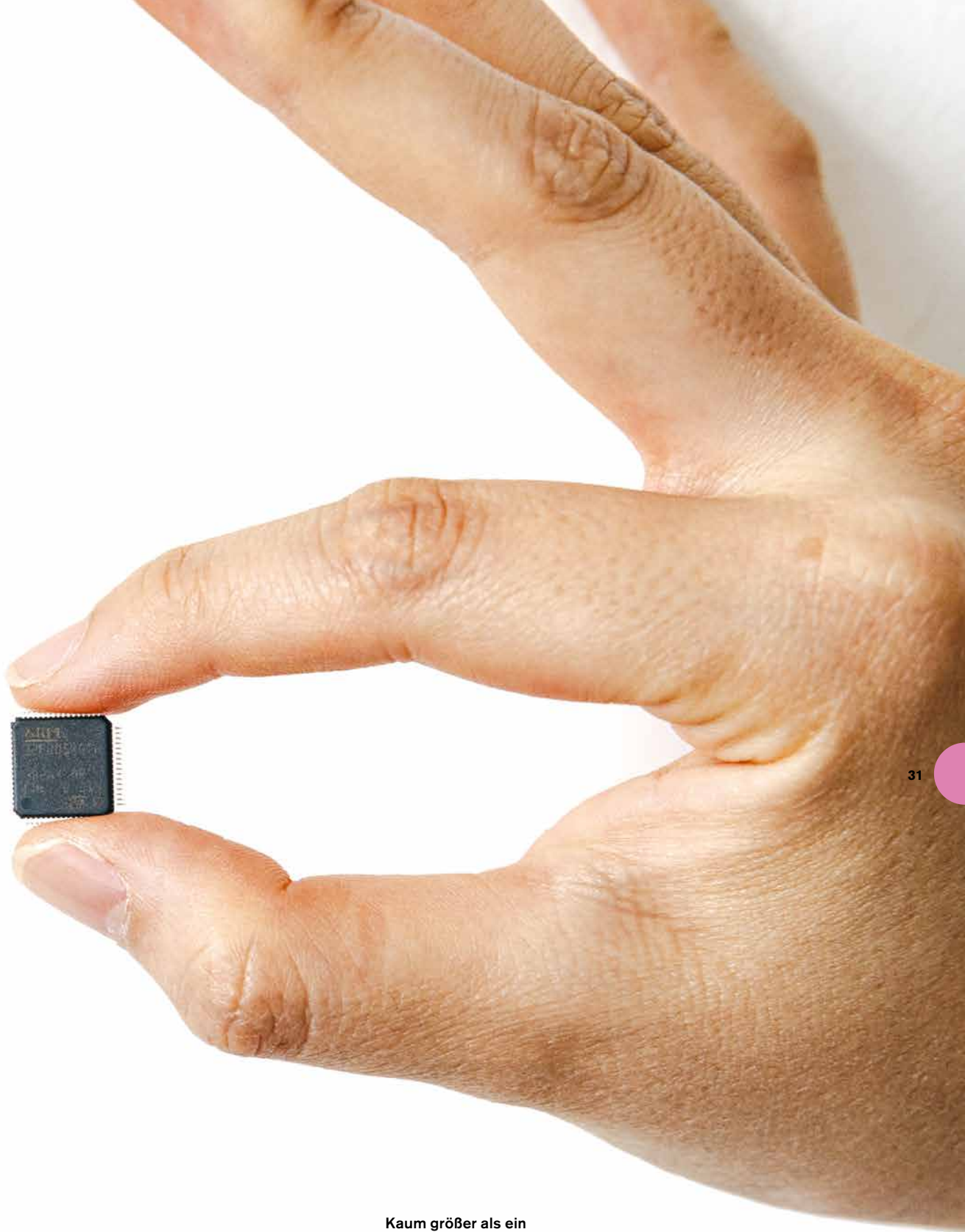


Chips unter Kontrolle?

30

Text:
Thomas Brandstetter

Software lässt sich aktualisieren. Hardware nicht. Manipulationen tief im Inneren eines Chips wären kaum zu entdecken – und könnten ganze Infrastrukturen gefährden. Gleichzeitig wird es höchste Zeit, Hardware auf die bevorstehenden Angriffe durch Quantencomputer vorzubereiten.



31

**Kaum größer als ein
Fingernagel: Dieser Chip
ist wie ein winziger
Computer. Aus dem
schwarzen Gehäuse ragen
64 metallene Füßchen.
Manche dieser Kontakte
dienen etwa der Stromver-
sorgung, die allermeisten
aber der Ein- und Ausgabe
von Befehlen und
Signalen.**

FOTO: JUDITH BÜTHE FÜR MPG

sche Geräte während des Transports heimlich abgefangen, geöffnet und vor der Auslieferung mit Überwachungs- oder Manipulationskomponenten versehen worden sein.

Eine Frage des Vertrauens

Die aktuellen geopolitischen Verwerfungen und die viel beschworene digitale Souveränität Europas rücken die Sicherheit von Hardware zunehmend in den Fokus. Der alte Kontinent ist zwar stark im Designen von Chips, verfügt jedoch kaum über eigene Fertigungskapazitäten und ist für die Herstellung der Chips deshalb auf andere Länder angewiesen. „Praktisch alle Schaltkreise, von denen wir umgeben sind, und unsere gesamte digitale Funkinfrastruktur beruhen auf Chips, die in Taiwan, China, Südkorea oder zu einem kleinen Teil auch in den USA gefertigt

gleichzeitig Wege zu finden, ihre Hardware-Produktion vertrauenswürdiger zu machen – und zwar noch bevor etwas passiert. Eine so naheliegende wie wichtige Methode dafür ist das rigorose Testen neuer Chips. „Wenn eine Zertifizierungsstelle zum Beispiel eine Mobilfunk-Basisstation oder einen Smartphone-Chip bekommt, kann man untersuchen, ob man den Chip mit bestimmten Inputs in einen Zustand versetzen kann, in dem er auf einmal anders reagiert, als er soll“, erklärt Paar. Solche Auffälligkeiten könnten dann ein erster Hinweis auf eine Manipulation sein. Um die Funktionsweise eines unbekannten Chips allerdings wirklich bis ins letzte Detail zu verstehen, bedarf es eines deutlich drastischeren Mittels: das gewaltsame, physische Öffnen, um tief in sein Innerstes blicken zu können. Dabei handelt es sich um einen äußerst aufwendigen, mehrstufigen Vorgang, der höchste Präzision verlangt und damit oft an die Grenze des finanziell, aber auch des technisch Machbaren geht.

Sie sind überall und bleiben doch meistens unsichtbar: Integrierte Schaltkreise, besser bekannt als Chips, stecken heute in nahezu jedem technischen Gerät, das uns umgibt. Sie wecken uns am Morgen, navigieren uns durch den Verkehr, verbinden uns mit Freundinnen und Kollegen. Ohne die kleinen schwarzen Blöcke mit ihren silbernen Beinchen läuft in der modernen Gesellschaft so gut wie nichts mehr. Kein Internet. Kein Smartphone. Kein Verkehr. In den meisten Fällen nicht einmal der Kühlschrank oder die Waschmaschine.

Die Sicherheit der omnipräsenten Hardware gewinnt in unserer digitalen Gesellschaft zunehmend an Bedeutung. Denn während Softwarefehler beziehungsweise Risiken durch schädliche Programme oft mit Updates behoben werden können, sind Manipulationen auf Hardwareebene kritischer: Sie sitzen tief im System und sind viel schwerer zu entdecken. Werden die fest verdrahteten Schaltungen eines Chips manipuliert, kann das ihr Verhalten auf unsichtbare Weise ändern: Befehle werden verfälscht, Sicherheitsmechanismen umgangen. Und Vertrauen wird zur Illusion.

Denn auch wenn die sprichwörtliche „Smoking Gun“ – also der unwiderlegbare Beweis für eine absichtlich eingebaute, heimliche Hintertür in einem Chip – bislang fehlt, tauchen immer wieder Hinweise darauf auf, dass staatliche Akteure auch in Hardwaresysteme eingreifen. So geriet bereits in den späten 1980er-Jahren die Schweizer Crypto AG unter Verdacht, gemeinsam mit der amerikanischen CIA und dem deutschen BND absichtlich geschwächte Verschlüsselungstechnik verkauft zu haben. Die später bekannt gewordene „Operation Rubikon“ bestätigte, dass beide Nachrichtendienste über Jahrzehnte die Firma kontrollierten. Und auch die Enthüllungen von Edward Snowden lieferten Hinweise auf Hardwareimplantate. So sollen im Rahmen der NSA-Methode „Interdiction“ elektroni-

wurden“, sagt Christof Paar, der am Max-Planck-Institut für Sicherheit und Privatsphäre in Bochum die Forschungsgruppe für Embedded Security leitet. Das setzt das Vertrauen voraus, dass diese Hersteller die Designs auch genau nach Plan umsetzen und nicht etwa auf staatlichen Druck versteckte Hintertüren in die Chips einbauen. Solche Manipulationen könnten es ermöglichen, aus der Ferne die Kontrolle über die Hardware zu übernehmen.

„Theoretisch könnte ein Hersteller wie Huawei in China einen „Kill-Switch“ in seine Chips einbauen und damit über ein geheimes Kommando alle Mobilfunkmasten mit Huawei-Hardware in Deutschland ausschalten“, sagt Paar. Gemeinsam mit seinen Kolleginnen und Kollegen versucht er deshalb, Sicherheitslücken in Computerhardware aufzuspüren und

„Theoretisch könnte ein Hersteller einen Kill-Switch einbauen.“

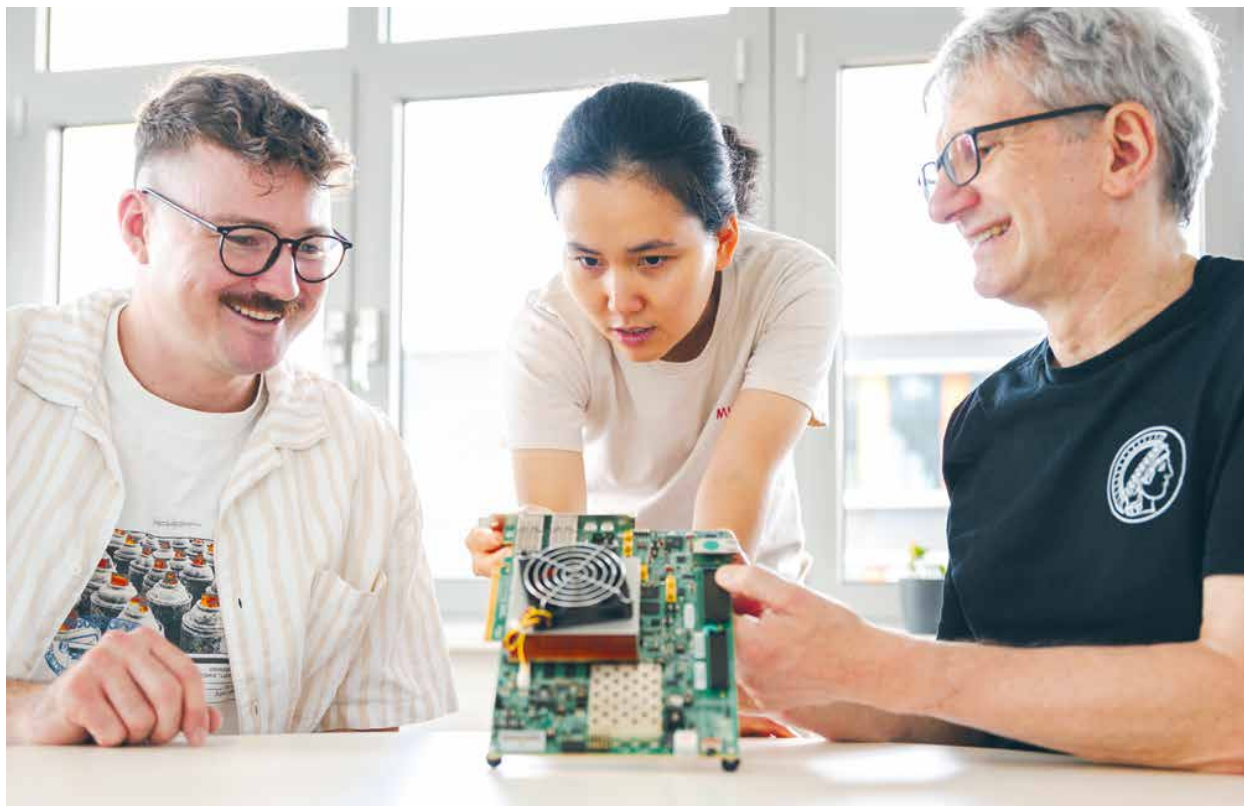
Christof Paar

Es beginnt mit der Zerstörung des schützenden schwarzen Gehäuses, das den eigentlichen Silizium-Kern umgibt, in dem sich Millionen winziger Transistoren befinden – die elementaren Schaltelemente des Chips. Darüber liegen zudem noch bis zu zwei Dutzend hauchdünne Schichten aus Metallbahnen, die die einzelnen Transistoren zu logischen Schaltungen verbinden.

Um den Schaltplan des Chips zu rekonstruieren, muss also der gesamte Aufbau Schicht für Schicht abgetragen werden. Und da die Strukturen viel zu klein sind, um sie einfach zu fotografieren, werden sie in der Regel mit einem Rasterelektronenmikroskop erfasst, was selbst für einen kleinen Chip mehrere Stunden pro Schicht dauern kann. Schließlich kann das Mikroskop jeweils nur einen winzigen Ausschnitt in der benötigten Auflösung

Komplizierte Technik: Julian Speith, Hoang Nguyen Hien Pham und Christof Paar (von links) begutachten eine Platine, auf der Mikrocontroller und andere elektronische Bauteile derart viel Wärme erzeugen, dass ein großer Lüfter auf der Oberseite diese aktiv kühlen muss.

FOTO: JUDITH BÜTHE FÜR MPG



aufnehmen und muss daher Tausende Einzelbilder pro Schicht anfertigen. „Das ist so, als ob man eine Landkarte erstellen muss, indem man viele kleine Fotos sauber aneinanderfügt“, erklärt Paar. In der Praxis ist dieser Prozess natürlich niemals perfekt.

Eine vollständige, physische Analyse eines modernen Mikroprozessors mit Milliarden von Transistoren, wie etwa der CPU eines Computers, ist ohnehin unrealistisch. Die Kosten und der Zeitaufwand sind astronomisch. Bei kleineren Chips wie etwa denen in Bankkarten, also solchen, die stark sicherheitsrelevant sind, ist das physische Öffnen und Analysieren zwar seit vielen Jahren etablierte Praxis. Doch auch in diesen vermeintlich „leichten“ Fällen gibt es Probleme. So sehen die Transistoren auf den Aufnahmen eines geöffneten Chips alle exakt gleich aus. Und auch wenn sich erkennen lässt, wo die Verbindungen zwischen ihnen verlaufen, sind die Funktionen, die sie ausführen, daraus nur sehr schwer abzuleiten. Bei herstellerepezifischer Hardware wird schließlich keine Gebrauchsanleitung mitgeliefert, die verraten würde, welcher Bereich auf dem Chip welche Funktion

umsetzt. Einer von Paars Forschungsansätzen zielt deshalb darauf ab, Chips von vornherein so zu konstruieren, dass sie sich leichter analysieren und validieren lassen.

Verknüpft man einzelne Transistoren eines Chips auf eine bestimmte Weise, nennt man sie auch „Gatter“. Signale finden ihren Weg über zwei Eingänge in so eine Schaltung, die nur jeweils einen Ausgang hat. Liegen etwa an einem ODER-Gatter eine Eins und Null an, gibt es eine Eins aus. An einem UND-Gatter müssen für dieselbe Ausgabe zwei Einsen anliegen. Solche Komponenten bilden das Fundament jeder digitalen Berechnung, sind aber auf verrauschten Mikroskopbildern schwer zu unterscheiden – ein Abgleich mit Original-Bauplänen wird damit erschwert. Würden die zugehörigen Bauteile von vornherein deutlich unterschiedlich aussehen, würde das auch die Manipulation eines Chips erheblich erschweren. „Wer einen Chip manipulieren will, muss letztlich bestimmte Gatter austauschen oder verändern – und genau diesen Vorgang gilt es durch geschicktes Design so schwer wie möglich zu machen“, sagt Paar.

Auf den Punkt gebracht

Hardware lässt sich nicht wie Software nachträglich aktualisieren, heimliche Manipulationen lassen sich in komplexen Elektronikchips nur schwer erkennen.

Ein Team am Max-Planck-Institut für Sicherheit und Privatsphäre sucht nach Wegen, Manipulationen durch physisches Öffnen von Chips zu erkennen und sichere, transparentere Chips zu entwickeln.

Die Open-Source-Software HAL analysiert Netzlisten, also rekonstruierte Chip-Baupläne, und findet mögliche Hardware-Trojaner, also zusätzliche Schaltungen, die Sicherheitslücken herbeiführen.

Eine andere Arbeitsgruppe entwickelt Open-Source-Chips, deren Funktion ohne aufwendiges Zerlegen einfach nachvollzogen werden kann. Durch minimale Anpassungen erweitern sie diese um quantensichere Schaltungen, also Verschlüsselungsverfahren, die auch vor Angriffen künftiger Quantencomputer schützen.

Ist ein Chip geöffnet und die physische Schaltung freigelegt, ist das aber ohnehin erst der Anfang der eigentlichen Suche nach Schwachstellen und Manipulationen. Denn nun muss erst in mühsamer Kleinarbeit der Schaltplan, auch Netzliste genannt, rekonstruiert werden: ein riesiger, unstrukturierter Bauplan des Chips. Und selbst damit lässt sich noch nicht allzu viel anfangen. Diese Netzliste enthält zwar Informationen zu einzelnen Transistoren und ihren Verbindungen. Es fehlt allerdings immer noch jegliche Beschriftung oder Erklärung, welche Funktionen sie erfüllen. Um aus der Netzliste die Funktionsweise eines ganzen Chips abzuleiten, haben Paar und seine Kollegen deshalb eine eigene Open-Source-Software entwickelt: HAL.

Unbekannte Chips verstehen

34 HAL ist nicht nur eine Anspielung an den mächtigen Computer HAL 9000 aus dem Science-Fiction-Klassiker *2001: Odyssee im Weltraum*, es steht auch für Hardware Analyzer. Die Software analysiert Netzlisten und hilft damit zu erkennen, ob ein Chip wirklich nur das tut, was er verspricht, und nicht etwa gegen die Interessen seines Nutzers handelt, indem er beispielsweise heimlich Daten nach außen schickt. „Die meisten Anwender von HAL sind Firmen, die im sicherheitsrelevanten Bereich arbeiten“, sagt Julian Speith, der als Postdoc in Paars Gruppe an der Entwicklung der Software beteiligt war. „Wir hatten beispielsweise Anfragen von staatlichen Forschungslaboren und Behörden.“

Ein wichtiger Anwendungsfall für HAL ist die Suche nach Hardware-Trojanern. Solche vorsätzlich in ein elektronisches Bauteil integrierte Schaltungen ermöglichen einen unbefugten Zugriff, um etwa vertrauliche Daten des Nutzers auszuspielen. Bisher hat HAL noch keine solche Manipulation entdeckt. Diese wäre aber auch extrem schwer zu finden, da es kein typisches Muster gibt, nach dem man gezielt suchen könnte. Um ihre Software zu testen, haben die Köpfe hinter HAL deshalb selbst einen virtuellen Chip entworfen und absichtlich eine zusätzliche Leitung eingefügt, die HAL finden soll. Dieses verborgene Bauteil leitet unter

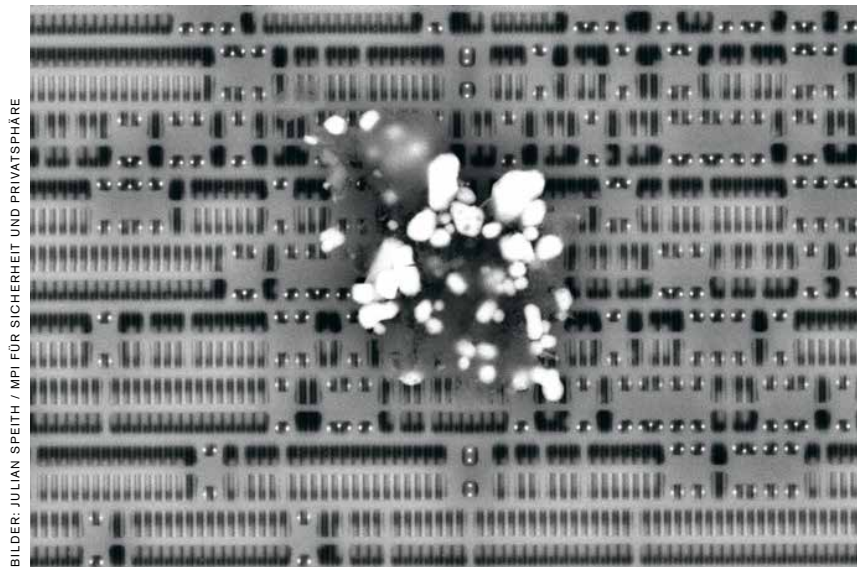
ganz bestimmten Bedingungen einen geheimen kryptografischen Schlüssel an den Ausgang des Chips. „Wenn Angreifer wissen, wie sie diese Funktion aktivieren können, können sie den Schlüssel einfach am Ausgang ablesen“, erklärt Speith. „Das ist ein Standardszenario in der Forschung zu Hardware-Trojanern.“ HAL ist aber bewusst nicht als vollautomatischer Schwachstellen-Scanner konzipiert, denn es gibt zu viele mögliche Trojaner dieser Art, die zu berücksichtigen wären. Seine Stärke liegt darin, Analytistinnen oder Analysten die relevanten Stellen im Chip zu zeigen. Die eigentliche Sicherheitsbewertung – also die Frage, ob eine Unregelmäßigkeit tatsächlich eine unsichtliche Schwachstelle oder ein absichtlich eingebauter Trojaner ist – bleibt dem Menschen überlassen. „Am Ende ist HAL auch dafür da, das Thema der Öffentlichkeit zugänglicher zu machen, weil bisher das allermeiste hinter verschlossenen Türen passiert“, sagt Speith.

Fit für die Post-Quantum-Ära

Bösartige Akteure, die heimlich Chips verändern, sind nicht die einzige Gefahr für die Sicherheit moderner Hardware. Viele Algorithmen, die über eine bestimmte Abfolge von Logikgattern und anderen Bau-

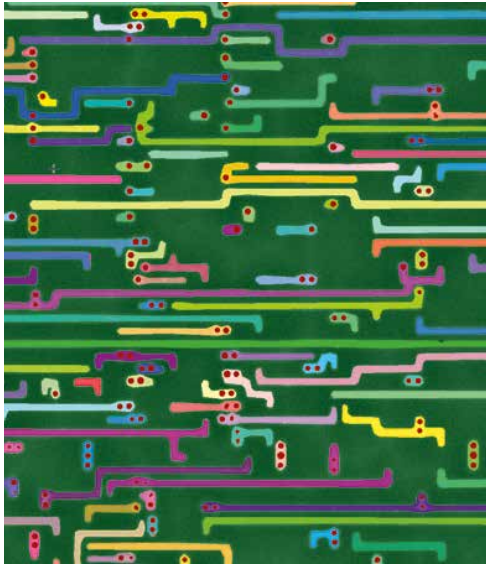
teilen fest in Chips verdrahtet sind und dort Verschlüsselungsfunktionen ausführen, könnten durch die Quantencomputer der Zukunft schnell geknackt werden. „Quantencomputer sind zum Beispiel eine Bedrohung für End-to-End-Verschlüsselungen von Messengerdiensten und die Sicherheitsmaßnahmen von Online-Finanztransaktionen“, sagt Hoang Nguyen Hien Pham. Als Doktorandin in der Gruppe für Cryptographic Engineering von Peter Schwabe am Max-Planck-Institut für Sicherheit und Privatsphäre arbeitet sie daran, in kryptografische Chips eingebrannte Algorithmen fit für die Zukunft zu machen.

Expertinnen wie Pham sprechen in diesem Zusammenhang von einer „Migration“ von klassischer Kryptografie hin zu Post-Quanten-Kryptografie. Die notwendigen Verschlüsselungsalgorithmen, an denen sich auch Quantencomputer in Zukunft die Zähne ausbeißen sollen, sind inzwischen erdacht und vom US-amerikanischen National Institute for Standards and Technology (Nist) standardisiert. Um sie auf Geräten wie Laptops, Smartphones oder auch auf Kreditkarten effizient zum Laufen zu bringen, muss allerdings auch noch deren Hardware angepasst werden. Institutionen wie das Nist oder auch die EU haben dafür Fristen bis um das Jahr 2030 gesetzt, und große Unternehmen wie Google, Amazon und



BILDER: JULIAN SPEITH / MPI FÜR SICHERHEIT UND PRIVATSPHÄRE

Verstaubt: Bereits ein winziges Staubkorn oder ein Kratzer auf der Oberfläche kann dazu führen, dass einige der Transistoren auf einem Bild verdeckt sind oder falsch interpretiert werden.



Wie im Irrgarten: Um sich zurechtzufinden, hilft es, die Leiterbahnen, die alle Schaltelemente eines Chips miteinander verbinden, farblich zu codieren.

Microsoft wollen ihre Migration in einem ähnlichen Zeitrahmen abschließen. Wenn dann tatsächlich die Meldung kommt, dass die Quantencomputer bereit sind, reale Systeme zu knacken, sollte das also kein allzu großer Schock für die Welt sein. „Es wird ein Meilenstein sein, auf den man gewartet hat, und wir sind bereits sehr gut

ihren Kolleginnen und Kollegen ist es deshalb, aktuelle Sicherheitschips mit möglichst kleinen Veränderungen an die Anforderungen der Zukunft anzupassen. „Wir fügen einem bereits existierenden Chip lediglich einige neue Befehle hinzu“, sagt die Forscherin. So soll auch gewährleistet werden, dass die Schaltkreise in der Zeit des Übergangs sowohl klassische als auch quantensichere kryptografische Algorithmen parallel unterstützen.

Als Grundlage für ihre Arbeit diente Pham und ihren Kolleginnen der Sicherheitschip OpenTitan, der etwa auf Laptops wie dem Chromebook die Grundlage für die Sicherheit des gesamten Gerätes bildet. Er überprüft schon beim Einschalten, ob die installierte Software unverändert ist, verwaltet kryptografische Schlüssel und stellt sicher, dass sich ein Gerät gegenüber anderen Systemen als echt ausweisen kann. All das läuft im Hintergrund, und obwohl es entscheidend ist für die Sicherheit, bekommen die Anwender in der Regel davon gar nichts mit. Während derartige Sicherheitschips traditionell von einzelnen Herstellern entwickelt wurden und ihre Funktionsweise weitgehend geheim blieb, verfolgt OpenTitan als Open-Source-Chip einen offenen Ansatz, wodurch Universitäten, Unternehmen und unabhängige Experten die Schaltungen

„Quantencomputer sind eine Bedrohung für Verschlüsselungen.“

Hoang Nguyen Hien Pham

darauf vorbereitet“, beruhigt Pham. „Viele Anwendungen wie beispielsweise WhatsApp oder Signal haben die Migration auch bereits auf den Weg gebracht.“

Im Grunde könnten die neuen, quantensicheren Algorithmen auch auf bestehenden sicherheitsrelevanten Hardwaresystemen laufen – allerdings nur sehr langsam und ineffizient. Völlig neue Chips dafür zu entwickeln, würde wiederum über das Ziel hinausschießen, da es mit enormem Aufwand verbunden und dementsprechend teuer wäre. Das Ziel von Pham und

überprüfen und erweitern können. Phams Erweiterungen sind inzwischen etwa fester Bestandteil von Pavona, einem neuen, auf OpenTitan aufbauenden Projekt. „Jeder Pavona-Chip, der in Zukunft auf dieser Basis gefertigt wird, wird also automatisch auch unsere Schaltungen beinhalten, damit auch Post-Quanten-Kryptografie dort effizient läuft“, sagt die Forscherin.

Nutzerinnen und Nutzern rät Pham dazu, zunächst erst einmal ein grundlegendes Bewusstsein für die Sicherheit ihrer jeweiligen Anwendungen im Alltag zu ent-

Glossar

OPEN SOURCE bezeichnet bei Hardware und Software den offenen Zugang zu allen Spezifikationen, Schaltplänen und Quellcodes. Mit dem nötigen Wissen sollen alle die Funktionsweise prüfen, Sicherheitslücken aufspüren und die Zuverlässigkeit des Systems verifizieren können. Das versteckte Einbauen von Hintertüren wird so erschwert.

POST-QUANTEN-KRYPTOGRAPHIE bezeichnet mathematische Probleme als Verschlüsselungsverfahren, die selbst für Quantencomputer schwer lösbar sein werden.

wickeln. Und natürlich sich, wenn möglich, für Apps zu entscheiden, die bereits für das Quantenzeitalter gerüstet sind. Denn auch wenn die Quantencomputer noch ein paar Jahre auf sich warten lassen, könnten Angreifer nach dem Motto „harvest now, decrypt later“ schon jetzt verschlüsselte Informationen abgreifen und so lange aufbewahren, bis die neue Technologie schließlich zur Entschlüsselung bereitsteht. „Setzen Sie lieber schon jetzt auf Post-Quanten-Kryptografie und dabei idealerweise auf Open-Source-Technologie“, lautet der Appell der Forscherin.

Denn gerade Offenheit gilt weithin als Schlüssel zu sicherer Hardware. Nur wenn Technologie öffentlich einsehbar ist, können Fachleute sie weltweit prüfen, um genau nachzuvollziehen, wie sie arbeitet – und schnell etwaige Sicherheitslücken melden. Das gilt nicht nur für Post-Quanten-Welt, sondern auch in Bezug auf die Gefahren, die von mutwillig manipulierter Hardware ausgehen: Je offener ein Design, desto schwieriger ist es, eine geheime Hintertür einzubauen. Oder wie Kryptograf Paar es zusammenfasst: „Transparenz sorgt für Vertrauen.“



www.mpg.de/podcasts/infrastruktur



Gebaut für die
Ewigkeit: Die 43 Meter
weite Kuppel des
Pantheons in Rom ist
aus Betonsteinen
gebaut und hat seit
dem 2. Jahrhundert
nach der Zeitenwende
Erdbeben und Plün-
derungen über-
standen.



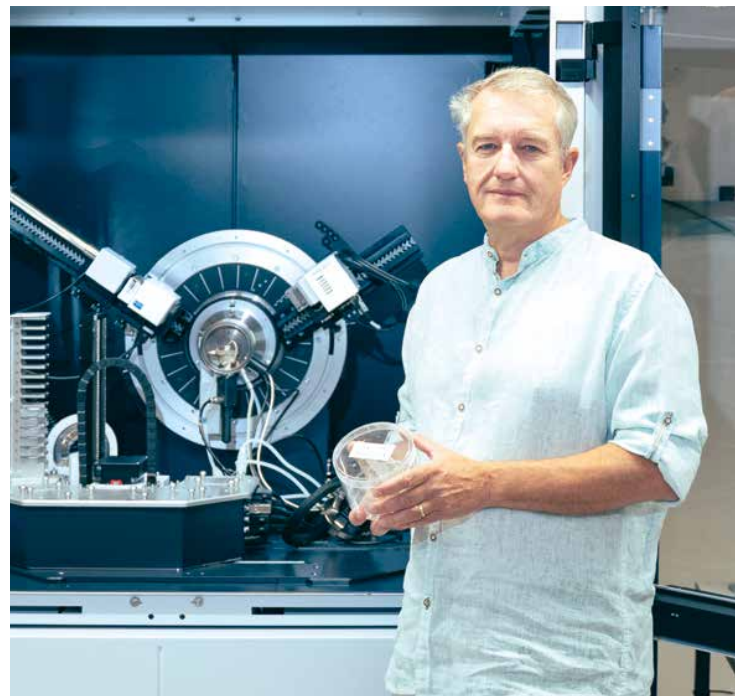
Bauen wie die Römer

37

Text:
Peter Hergersberg

Moderne Gebäude aus Beton bröckeln nach einigen Jahrzehnten – marode Brücken zeugen davon. Römische Betonbauten stehen dagegen nach Jahrtausenden immer noch. Und bei der Produktion des antiken Baumaterials entstand auch nur wenig CO₂. Das Team des Ricimer-Projekts sucht daher in der Antike Anregungen, wie moderner Beton nachhaltiger werden könnte.

FOTO: WIRESTOCK / ADOBE STOCK



Wein, Essig und Olivenöl – sie verfeinern seit Jahrtausenden nicht nur die mediterrane Küche, sie könnten auch als besondere Würze in der antiken Baukunst gedient haben. Denn möglicherweise haben die Zutaten dazu beigetragen, dass ein antiker Baustoff heute noch Maßstäbe setzt und in der Materialwissenschaft für Rätsel sorgt: römischer Beton. Der zeichnet sich dadurch aus, dass er bemerkenswert stabil ist, Risse von selbst kittet und deshalb besonders langlebig ist. Die römischen Baumeister konnten ihn so zusammenmischen, dass er anders als der normale heutige Zement Salzwasser widerstand und Hafenanlagen zu dauerhaften Bauwerken machte. Sein heute vielleicht überzeugendster Vorzug: Bei seiner Produktion wurde weniger CO₂ freigesetzt als bei der Herstellung von modernem Zement. Wie die Römer diese Eigenschaften erreicht haben, ist bis heute nicht völlig klar.

Vor allem die Klimafreundlichkeit und Langlebigkeit des römischen Betons haben es der Materialwissenschaft angetan – auch dem Team des Ricimer-Projekts, in dem Forschende der Abteilung Nanochemie unter Leitung von Bettina Lotsch am

Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart und des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen kooperieren. Ricimer war ein spätrömischer Heerführer, steht hier aber für Roman inspired cement innovation by multi-analytical enhanced research – ein von der Max-Planck- und Fraunhofer-Gesellschaft gefördertes Projekt.

Beton nachhaltiger zu machen, ist dringend geboten. Denn für Beton werden jährlich weltweit rund vier Milliarden Tonnen Zement hergestellt, und die Zementindustrie trägt schätzungsweise rund acht Prozent zu den globalen CO₂-Emissionen bei. Helfen würde da schon, wenn Bauwerke länger stünden. „Beton hält in den gemäßigten Breiten etwa 70 Jahre, in den Tropen höchstens 30“, sagt Sebastian Bette, der das Ricimer-Projekt am Max-Planck-Institut betreut. Dann muss ein Bauwerk repariert werden, und oft hilft nur abreißen und neu bauen. Um die Haltbarkeit zu erhöhen und auf diese Weise die CO₂-Emissionen zu senken, sucht das Ricimer-Team Inspiration bei den Römern. Doch die ist nicht so leicht zu finden. „Unser Wissen über römischen Beton ist begrenzt“, sagt Sebastian Bette. „Die Römer haben über ihren Beton zwar viel aufgeschrieben, das ist aber nicht immer aufschlussreich.“ In den Aufzeichnungen

werden auch Wein, Öl und Essig als Zutaten erwähnt. Warum sie untergemischt wurden, ist aber unklar. Möglicherweise sollten Essig- und Weinsäure die Aushärtung beeinflussen. Auch wie römischer Beton erfunden wurde, haben die Jahrtausende vernebelt. Angefangen hat es vermutlich mit Mörtel zwischen Steinblöcken. Mit der Zeit wurden die Steine immer kleiner und der Anteil des Mörtels immer größer, bis man schließlich bei Beton landete.

Chemisches Kuddelmuddel

Dass die Bauindustrie nicht einfach auf ein Rezept der alten Römer zurückgreifen kann, liegt auch daran, dass es das eine Rezept nicht gab. Denn der Baustoff wurde nicht wie heute in großen Fabriken, sondern in kleinen Handwerksbetrieben hergestellt. Die setzten oft ihre eigenen Mixturen an. Bei der Rekonstruktion kommen auch die ausgeklügelten analytischen Verfahren, die der Materialwissenschaft heute zur Verfügung stehen, an ihre Grenzen. Zum einen weil das Baumaterial über die Jahrtausende verwittert ist. Zum anderen weil Beton zwar nach einem geradezu banalen Massenprodukt



FOTOS: ANGELIKA GRAF

Sie durchleuchten Beton: Artem Shevchenko (links) justiert ein hauchdünnes Probenröhrchen für eine Röntgenuntersuchung, Robert Dinnebier (Mitte) präsentiert ein Stück römischen Beton und Sebastian Bette (rechts) stellt ein Röntgenpulverdiffraktometer ein.

Auf den Punkt gebracht

Römischer Beton ist sehr langlebig, weil er Selbstheilungskräfte besitzt. Er wird zudem mit weniger gebranntem Kalk hergestellt, sodass bei seiner Herstellung weniger CO₂ frei wurde als bei modernem Portlandzement.

Die vulkanische Asche, die in römischem Beton verwendet wurde, könnte sich durch Bestandteile der Asche aus städtischen Müllverbrennungsanlagen ersetzen lassen. Dafür sind jedoch noch einige Fragen zu klären.

Das Ricimer-Team hat eine kostengünstige und gut verfügbare Substanz identifiziert, die moderne CO₂-arme Betonarten potenziell schneller härten lässt, sodass diese praxistauglicher werden.

Das Mineral Strätlingit könnte zur Selbstheilung des Betons beigetragen haben. Es kann Wasser aufnehmen und sich dabei ausdehnen. Das Ricimer-Team hat seine atomare Struktur und sein chemisches Verhalten genauer bestimmt.

klingt, aus materialwissenschaftlicher Sicht ist er das aber keineswegs. Das gilt sowohl für antiken Beton als auch für seine modernen Nachfolger. „Im abgebundenen Beton gibt es 20 bis 30 unterschiedliche kristalline Phasen“, sagt Sebastian Bette. Eine Phase bezeichnet in der Chemie einen Stoff von einheitlicher chemischer Zusammensetzung und Struktur. Bei einem Kuddelmuddel von bis zu 30 Phasen ist es schwierig, sich einen Überblick zu verschaffen.

Der komplizierte Aufbau überrascht vielleicht auch deshalb, weil zumindest heutiger Beton im Wesentlichen aus drei einfachen Zutaten zusammengemischt wird: Sand oder Schotter, der manchmal durch die Schlacke etwa aus Hochöfen oder Kohlekraftwerken ergänzt wird, Wasser und natürlich Zement als Bindemittel. Die Komponenten bestehen teilweise schon aus verschiedenen chemischen Verbindungen, und beim Abbinden entstehen weitere. Zudem verwendet die Zementindustrie Zusätze, um die Eigenschaften zu modifizieren. So setzen Bauunternehmen je nach Anwendung unterschiedliche Zementarten ein, der häufigste ist aber Portlandzement. Der besteht hauptsächlich aus Calciumoxid, landläufig gebrannter Kalk genannt. Vermischt mit Ton und den Zusätzen wird daraus Zementklinker

gebrannt. Aus Sicht des Klimaschutzes ist der gebrannte Kalk das Problem: Er entsteht, indem gemahlener Kalkstein, also Calciumcarbonat auf etwa 1400 Grad Celsius erhitzt wird. Das kostet nicht nur viel Energie. Bei der Umwandlung von Calciumcarbonat zu Calciumoxid werden auch riesige Mengen CO₂ frei.

„Für römischen Beton wurde deutlich weniger Calciumoxid verwendet“, sagt Sebastian Bette. Dafür mischten römische Baumeister Vulkanasche hinein. Sie enthält Puzzolane, Aluminiumsilikate, die Calciumoxid ersetzen können. Doch aus verschiedenen Gründen ist es so gut wie unmöglich, ein antikes Rezept in die Gegenwart zu übertragen. „Römischer Beton brauchte Wochen zum Aushärten“, sagt Artem Shevchenko, der als Doktorand im Ricimer-Projekt forscht. „Heute will man die Stockwerke eines Gebäudes aber möglichst schnell hintereinander gießen.“

Zudem ist die wesentliche Komponente von römischem Beton nur begrenzt verfügbar. „Es gibt einfach nicht genug Vulkanasche“, sagt Sebastian Bette. Zumal diese auch vom richtigen Vulkan stammen muss: Das heißt, er muss besonders feine Asche erzeugen, damit sie chemisch reaktiv ist und als Bindemittel dienen kann. In offiziellen römischen Gebäuden wie dem Pantheon oder dem Kolosseum findet sich nur die Asche vom Vesuv im süditalienischen Kampanien. In privaten Gebäuden waren die Bauleute flexibler: Eine internationale Kooperation, in dem die Forschenden des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung unter anderem mit italienischen Archäologinnen und Archäologen zusammenarbeiteten, hat den Beton des einst privaten Landguts Villa Capo di Bove mit eigenem Thermalbad in Rom untersucht. Um die Herkunft der Asche im Zement bestimmen zu können, entwickelte Riccardo Manzo, der am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung und am Desy in Hamburg forscht, zunächst einen analytischen Instrumentenkasten. Unter anderem mit ausgeklügelten Röntgenanalysen, aber auch mit Lichtmikroskopen identifizierten er und seine Kollegen im Zement den chemischen Fingerabdruck einer Vulkanasche, die unweit von Rom

39

abgebaut wurde. Die Archäologie lernte daraus, dass die Römer auch mit heimischer Asche bauten und das Material nicht immer aufwendig aus Süditalien herbeischafften. Für die Materialwissenschaft lieferte die Studie ebenfalls interessante Erkenntnisse: „Die Rezeptur von römischem Beton war variabel“, sagt Riccardo Manzo. Außerdem verwendeten römische Baumeister selbst in privaten Gebäuden unterschiedlichen Beton und wussten offensichtlich ganz genau, dass sie dem Beton für die Thermalbecken Terrakottascherben untermischen mussten, damit die auch auf lange Sicht dem Badewasser standhielten. Denn das leicht saure Wasser greift normalen Beton mit der Zeit an, sodass er schließlich reißt.

Beton für verschiedene Zwecke gibt es heute auch, aber der hält höchstens einige Jahrzehnte. Die Vielfalt der römischen Rezepturen ist dabei für die Entwicklung heutiger Baustoffe erst einmal ein Fluch. Denn Zementwerke stellen ihr Produkt heute mit genau definierter Zusammensetzung und möglichst immer gleichen Eigenschaften her. Nur so kann er die existierenden DIN-Normen erfüllen – und die Ansprüche der Bauingenieure, die für ihre statischen Berechnungen wissen müssen, was ein Beton aushält und was nicht. Etwas mutiger gedacht liegt in der Vielfalt aber auch eine Chance: „Vielleicht können wir auch die Zusammensetzung von modernem Beton stärker variieren“, sagt Sebastian Bette. Gerade der antike Baustoff zeigt, dass er Jahrtausende überdauern kann, obwohl er keine DIN-Norm erfüllt. Die Variabilität könnte vor allem für ein Vorhaben des Ricimer-Teams hilfreich sein. Die Forschenden experimentieren nämlich auch mit der Asche aus Müllverbrennungsanlagen, die in Teilen ähnlich zusammengesetzt ist wie Vulkanasche. Nach den heutigen Regeln der Bauindustrie ist das jedoch nicht der praxis-

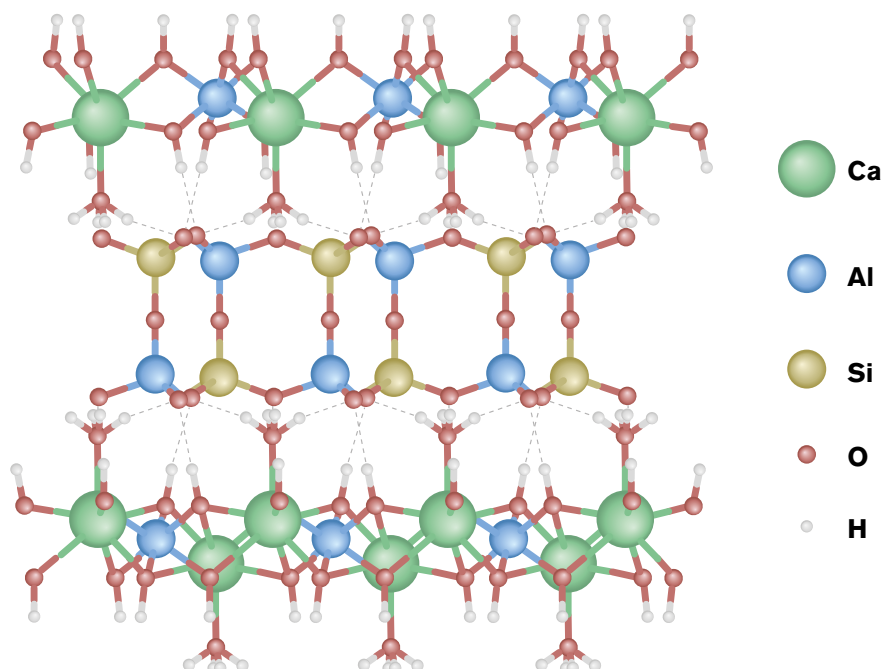
tauglichste Baustoff. Nicht zuletzt weil jede Kommune unterschiedlichen Müll verbrennt, unterscheidet sie sich wie Vulkanasche je nach Herkunft.

Asche unter Strom

Egal jedoch aus welcher Müllverbrennungsanlage die Asche kommt, sie enthält verschiedene Bestandteile. Nicht alle sind für Zement zu gebrauchen, einer aber ist besonders interessant: eine Komponente, die etwas unspezifisch als anorganische Asche bezeichnet wird – ein wildes Gemisch verschiedener Mineralien, die den Bestandteilen der Vulkanasche ähneln und als CO_2 -armes Bindemittel dienen könnten. Daneben finden sich in Abfallasche glasartige Substanzen und Metalle, unter anderem elementares Aluminium. Und das will man im Beton auf keinen Fall haben. Denn im aushärtenden Beton reagiert es mit der alkalischen Lösung in den Poren des Materials, sodass gasförmiger Wasserstoff entsteht. Der würde den Beton aufsprengen und das Gebäude zerbröckeln, bevor es überhaupt fertig ist. Um solche Mixturen wie die Asche aus der Müllverbrennung zu trennen und gezielt einzelne Komponenten herauszupicken, setzen die Fraunhofer-Partner vom Insti-

tut für Bauphysik unter der Leitung von Volker Thome im Ricimer-Projekt ein Trennverfahren ein: Mit einer elektrischen Entladung schmelzen sie die Bestandteile blitzartig und bringen sie durch geschickte Steuerung des Prozesses dazu, sich beim Abkühlen zu größeren Körnern zusammenzuballen, die sich leicht trennen lassen. „Das kostet bislang ziemlich viel Energie“, sagt Artem Shevchenko. „Das Problem lässt sich aber vermutlich lösen.“ Mit anderen Problemen dürfte das schwieriger sein. So können die anorganischen Aschen auch nach der Elektroschockbehandlung noch geringe Mengen Schwermetalle enthalten. Dann löst man ein Umweltproblem, indem man ein anderes schafft. „Wie sich Müllverbrennungsasche in Beton einsetzen lässt, ist eine Frage, die noch intensiv erforscht werden muss“, sagt Sebastian Bette.

In anderer Hinsicht inspiriert die Antike das Ricimer-Team zu Ergebnissen, die schneller praxisrelevant werden könnten. Es geht um Beton, der wie römischer Beton wenig Zementklinker enthält und deshalb klimafreundlich ist, aber für die meisten Bauvorhaben zu langsam aushärtet. „Wir haben unter anderem einen Zusatz gefunden, der gut verfügbar und preiswert ist und die Härtung von CO_2 -armem Beton offenbar so beschleunigen könnte, dass er praktisch eingesetzt wer-



Könnte Selbstheilungskräfte verleihen: Das Ricimer-Team hat das Strukturbild von Strätlingit entscheidend präzisiert und dabei festgestellt, dass das Mineral Wasser aufnehmen kann und so möglicherweise Risse in römischem Beton verschließt.

den könnte“, sagt Sebastian Bette. Mehr kann er nicht verraten, weil die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind.

Auch bei der Frage, warum römischer Beton so langlebig ist, hat das Ricimer-Team Fortschritte gemacht. Ausschlaggebend sind daher die Selbstheilungskräfte, die heutigem Beton fehlen. Daher hat sich Artem Shevchenko die Phase, also die fein verteilten Körnchen gleicher chemischer Zusammensetzung und Struktur, im römischen Beton vorgenommen, denen die Selbstheilungskraft zugesprochen werden. Dieser Bestandteil heißt Strätlingit. Shevchenko und seine Kollegen wollen wissen, ob dieses Mineral tatsächlich Schäden im Beton heilen kann. Ob es bereits mit der Vulkanasche in den Beton gelangt ist oder sich dort erst gebildet hat. Und wie man es erzeugen kann. Die Forschenden untersuchen zu dem Zweck auch die Substanzen, die mit Strätlingit chemisch verwandt sind und die man nach Bedarf erzeugen oder vermeiden will.

und beim Strätlingit mussten sie ihre ganze Kunst aufwenden. „Das Mineral kommt in der Natur vor, aber in Form von Nanokristallen mit vielen Defekten“, sagt Shevchenko. Also hat er im Labor selbst chemisch reine kristalline Proben hergestellt. Anschließend hat er sie in fingerlange Glasröhrchen gefüllt, die weniger als einen Millimeter dünn sind. Denn in den feinen Röhrchen liefert das Kristallpulver besonders scharfe Röntgenbeugungsbilder.

Unter anderem anhand solcher Aufnahmen haben die Forschenden das Bild der Kristallstruktur von Strätlingit grundlegend verfeinert. So haben sie auch festgestellt, dass das Mineral Wasser aufnehmen kann und dabei anschwillt. „Das könnte die Selbstheilungskraft von Beton erklären“, sagt Artem Shevchenko: „Wenn Beton reißt, dringt dort Feuchtigkeit ein. Strätlingit kann diese Feuchtigkeit aufnehmen, sich dabei ausdehnen und einen Riss verschließen.“ Die detaillierten Beugungs-

„Wir haben einen Zusatz gefunden, der preiswert ist und die Härtung von CO₂-armem Beton beschleunigen könnte.“

Sebastian Bette

In den Artikeln, die Shevchenko und das Ricimer-Team dazu veröffentlicht haben, muss man sich durch ein Dickicht aus chemischen Formeln, Strukturnamen und -bildern verschiedener Mineralien kämpfen, vor allem von Calcium- und Aluminium-, aber auch Siliziumoxiden. Aber ohne geht es nicht: „Die Struktur bestimmt die Eigenschaften eines Materials“, erklärt Robert Dinnebier, der die Röntgenografieeinrichtung am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung leitet. Also geht es zunächst darum, sich ein genaues Bild der Struktur von Strätlingit in Reinform zu machen. Das ist auch wichtig, um das Mineral im chemischen Durcheinander von Beton identifizieren zu können. Für die Strukturanalyse nutzen Robert Dinnebier und seine Mitarbeitenden die Röntgenpulverdiffraktometrie. Die Methode ist ihre Spezialität,

bilder des Minerals dienen zudem als Referenz für die Analysen von Beton. „Jede der bis zu 30 Phasen im ausgehärteten Zement hinterlässt darin einen eigenen Fingerabdruck“, erklärt Sebastian Bette. „Um eine einzelne Substanz identifizieren zu können, brauchen wir möglichst gute Daten von ihrer Reinform.“ Das Ricimer-Team hat sich auch ein ziemlich genaues Bild gemacht, wie sich Strätlingit chemisch verhält: Wie es sich im Labor in reiner Form erzeugen lässt und was daraus entstehen kann. Dabei kam Shevchenko der Zufall zur Hilfe. Eigentlich wollte er für die Röntgenuntersuchungen möglichst reine Proben des Minerals herstellen und erhitzte die Substanz zu dem Zweck in der Lösung, in der es sich gebildet hatte. So entstand zwar kein Strätlingit, aber eine Schwesterverbindung, genauer gesagt siliziumhaltiger Katoit. Er findet sich auch

Glossar

RÖNTGENPULVER-DIFFRAKTOMETRIE heißt eine Methode, bei der Röntgenlicht auf eine pulverförmige Probe gestrahlt wird. Die Strahlung wird an den winzigen Kristallen in der Probe gebeugt. Das Beugungsbild, das dabei entsteht, hängt von der jeweiligen Kristallstruktur ab.

in antikem und modernem Beton. Wie das Mineral die Eigenschaften beeinflusst, ist noch unklar. „Wir können es aber herstellen, wenn wir es brauchen.“

Mit den detaillierten Analysen von Strätlingit und seinen Schwesterverbindungen hat das Max-Planck-Team schon eines seiner Ziele im Ricimer-Projekt erreicht. „Ob die Römer bewusst strätlingithaltige Vulkanasche in Beton gemischt haben, um seine Lebensdauer zu verlängern, können wir mit unseren Untersuchungen zwar nicht beantworten“, sagt Sebastian Bette. „Aber wir wissen jetzt, dass es im Beton stabil geblieben ist, wenn sie es von vornherein dazugegeben haben.“

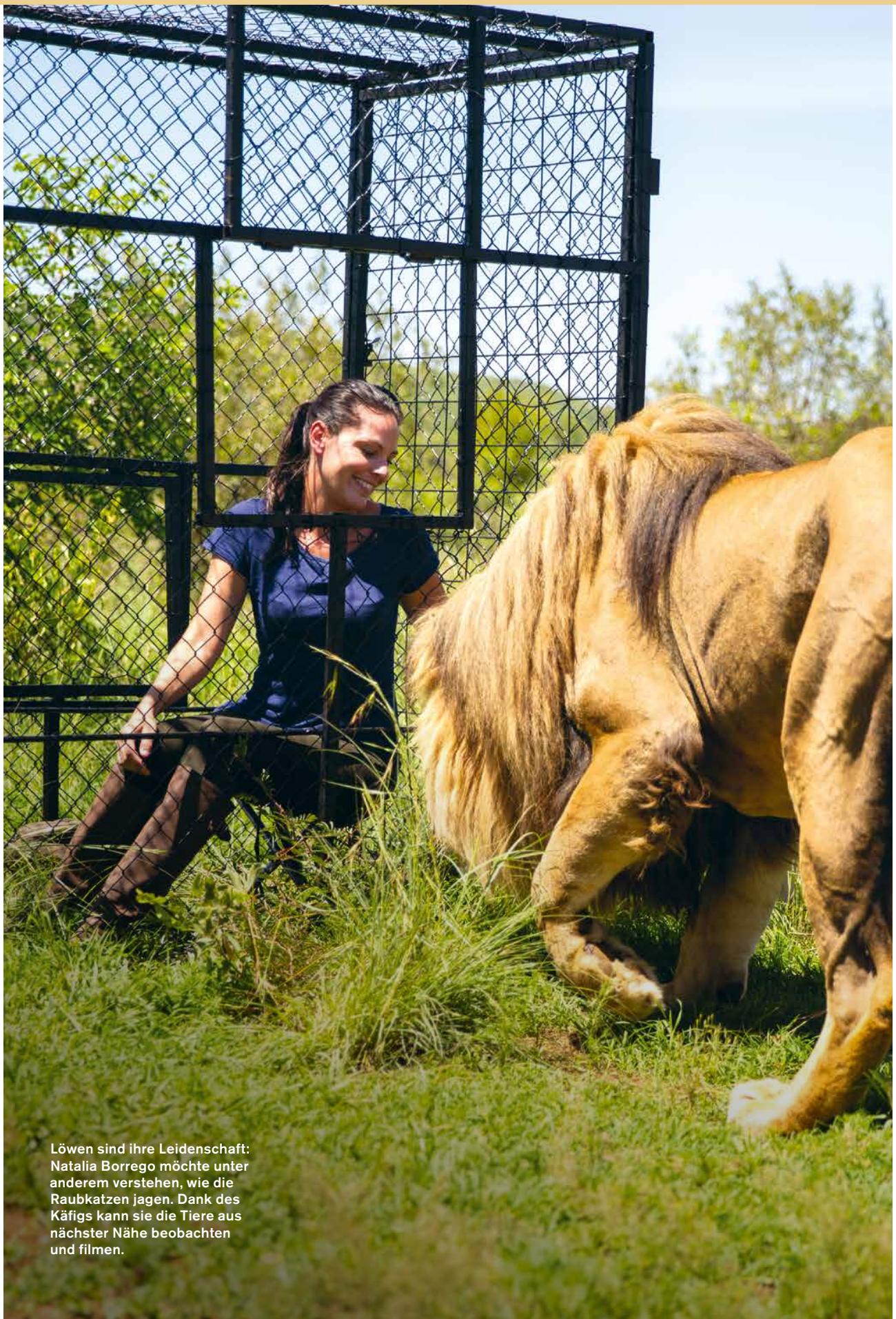
41

Um noch besser zu verstehen, wie römischer Beton zu seinen formidablen Eigenschaften kommt und wie sich moderner Beton langlebiger und nachhaltiger machen lässt, hat die Materialwissenschaft noch einiges zu tun. Denn dafür muss sie zumindest die wichtigsten, möglichst sogar alle anderen chemischen Bestandteile im Beton ähnlich gründlich untersuchen, wie es das Max-Planck-Team mit Strätlingit getan hat. Spekulation wird aber vermutlich bleiben, ob die Römer bewusst Wein, Öl und Essig in ihren Beton mischten, um dessen Eigenschaften zu beeinflussen. Möglicherweise waren die Zutaten auch als Opfergaben gedacht und sollten die Gottheiten gewogen stimmen, ein Bauwerk auf ewig stehen zu lassen.



www.mpg.de/podcasts/infrastruktur





Löwen sind ihre Leidenschaft: Natalia Borrego möchte unter anderem verstehen, wie die Raubkatzen jagen. Dank des Käfigs kann sie die Tiere aus nächster Nähe beobachten und filmen.

Natalia Borrego

Text:
Nora Lessing

Sind soziale Spezies intelligenter? Und wie genau organisieren Raubtiere ihr Zusammenleben in Gruppen? Solchen Fragen geht die Löwenforscherin Natalia Borrega am Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie in Konstanz nach. Um ihren Wissensdurst zu stillen, legt die Amerikanerin den Großkatzen GPS-Halsbänder um – und bereist den afrikanischen Kontinent, um vor Ort allerlei über deren Sozialverhalten herauszufinden.

„Man kann sagen: Ich habe mein ganzes Leben auf Tiere und Reisen ausgerichtet“, sagt Natalia Borrego und lacht. Bereits als Kleinkind zog die in Texas geborene Forscherin mehrfach um, lebte mit ihren Eltern zunächst in St. Louis in Missouri, später dann in Florida wo sie auch studierte, bevor sie in die große weite Welt aufbrach – nach Subsahara-Afrika, nach Ägypten und schließlich nach Deutschland. Immer im Gepäck: Das ein oder andere Haustier. Ob nun eine Katze oder, wie in den letzten zehn Jahren, ihre Dänische Dogge Lysander. „Die Lust am Reisen habe ich von meiner Mutter geerbt“, glaubt die Forscherin. Diese war nämlich Flugbegleiterin, legte ihrer Tochter somit schon in jungen Jahren nahe, dass es in der Welt viel zu entdecken gibt. Der Vater wiederum, ein Veterinär aus Mexiko,

weckte in ihr die Begeisterung für Tiere und deren vielschichtiges Sozialverhalten.

Als Jugendliche half Natalia Borrego in der väterlichen Tierarztpraxis aus, verdiente sich so ihr Taschengeld – und sog dabei wissbegierig auf, was es über die Versorgung kranker und verletzter Tiere zu lernen gab. „Überwiegend haben wir Katzen und Hunde verarztet. Die Leute brachten uns aber auch allerlei verletzte oder verwaiste Wildtiere, die wir dann gemeinsam aufgepäppelt haben – Waschbären und Opossums, süße kleine Babyeichhörnchen“, erinnert sich die Forscherin. Begeistert machte sie sich daran, den Wildtieren zu helfen, entwickelte bald schon den Wunsch, selbst einmal Tierärztin zu werden. Zunächst jedoch musste sie die Schule meistern – und das war nicht immer ganz leicht für sie. „Ich war ziemlich introvertiert und verträumt. Auf der regulären Highschool war ich entsprechend nicht besonders beliebt, galt als Außenseiterin.“ Mit dem Wechsel auf ein Internat in St. Louis jedoch änderte sich das schlagartig.

Hier war Natalia Borrego von ihresgleichen umgeben – zurückhaltenden Mädchen und Jungen, die gerne lasen und ihren Gedanken nachhingen. Die junge Frau blühte auf. „Das Internat lag auf dem Land, inmitten wunderschöner Natur. Ich bin durch die Wälder spaziert, hatte ganz viel Freiheit. Das habe ich unheimlich

→

genossen.“ Sie war die erste Schülerin dort, die ein Haustier mitbringen durfte – ein Leben ohne ihr Frettchen konnte sich Natalia Borrego nämlich beim besten Willen nicht vorstellen. Mit dem Tier im Arm las sie nächtelang Thriller, Fantasyromane und Science-Fiction, Bücher von Stephen King und Charles Bukowski. „Schon damals lag ich nachts oft wach, das geht mir bis heute so. Also habe ich gelesen, jede Woche ein bis zwei Romane, bin in andere Welten abgetaucht.“

Zum Studium kehrte Natalia Borrego nach Florida zurück. Sie wollte bei ihrer Familie sein – und in der Sonne. Wie geplant schrieb sie sich zunächst für Veterinärmedizin ein. Ihr Enthusiasmus für das Fach wurde jedoch bald schon auf die Probe gestellt. „Mein Vater fragte mich, ob dieses Studium wirklich das Richtige für mich sei – und da hatte er recht: Als Tierärztin hat man nämlich vor allem mit Menschen zu tun. Und das fällt mir nicht immer ganz leicht.“ Über Jahre hatte sie beobachtet, wie ihr Vater an seinem Beruf litt, wenn er sah, dass Tiere schlecht behandelt wurden oder aus Geldmangel eingeschlafert werden mussten. Zugleich belastete ihn der viele Kontakt: Er sehnte sich nach dem Alleinsein, der Stille. „Da bin ich genau wie mein Vater: Wir lieben Tiere ebenso wie die Stille, fühlen uns am wohlsten, wenn wir draußen in der Natur sind, mit unseren Haustieren irgendwo im Wald sitzen und ein Buch lesen.“

Am Ende war es die organische Chemie – ein Fach, das der Forscherin überhaupt keinen Spaß machte –, die sie beschließen ließ, ihre Pläne zu ändern. Sie wechselte an die Fakultät für Landwirtschaft, schrieb sich für Wildtierökologie und Naturschutz ein. Ein Volltreffer. „Ich habe damals etliche Praktika gemacht, auf einer Farm und mit Schweinen gearbeitet, ein Pferd gezähmt. Als Projektassistentin durfte ich jungen Schwarzbären GPS-Halsbänder umlegen, sodass wir nachher ihre Bewegungen in freier Natur nachvollziehen konnten. Für mich war das eine ganz tolle Zeit.“ Nachdem Natalia Borrego einem Masterstudenten bei der Datenauswertung geholfen hatte, stand für sie fest: Sie wollte diese Art von Arbeit möglichst lange fortführen. Im Masterstudium forschte sie zum Verhalten von Wildvögeln, beschloss dann zu promovieren.

„Ich interessierte mich damals sehr für die Populationsökologie von Mangusten – also dafür, wie sich die Populationen mit der Zeit entwickeln“, berichtet die Wissenschaftlerin. Rund ein Jahr lang recherchierte sie

zu diesem Thema. Dann jedoch stieß sie unverhofft auf einen Fachartikel zur Verstandesleistung von Tieren. Er faszinierte sie so sehr, dass sie beschloss, ihre Pläne über den Haufen zu werfen. „Was mich damals so umgehauen hat, war die Soziale-Intelligenz-Hypothese: Diese besagt, dass soziales Verhalten mit einer höheren geistigen Leistungsfähigkeit einhergeht, dass es da also eine evolutionäre Verbindung gibt“, erinnert sich Natalia Borrego. „Ich wollte unbedingt herausfinden, ob das stimmt.“ Hierzu musste die junge Frau einen Weg finden, unterschiedliche Spezies sinnig miteinander zu vergleichen. Die Herausforderung: Ihre tierischen Probanden mussten hierfür nahe Verwandte sein und zugleich ein komplett anderes Sozialverhalten zeigen.

Genau das trifft auf einige Arten zu, denen man lieber nicht im Dunkeln begegnen möchte: Während Leoparden und Tiger gern allein durch die Lande streifen, leben Hyänen und Löwen in großen Verbänden, gehen lebenslange Bindungen ein. Die Soziale-Intelligenz-Hypothese beschloss Natalia Borrego entsprechend an diesen vier Spezies zu testen – mithilfe einer „Puzzlebox“. „Das ist eine große, relativ schwere Box, in der ein Stück Fleisch liegt. Man kommt nur an das Fleisch heran, wenn man in einem ganz bestimmten Winkel an einem Seil zieht, das an der Box befestigt ist“, erläutert die Forscherin ihren Versuchsaufbau. Mit der Box im Gepäck reiste sie in ein südafrikanisches Tierreservat, in dem auch Tiger gehalten werden. Herausfinden wollte sie dort nicht nur, ob die Raubtiere in der Lage sind, die Box zu öffnen. Vielmehr wollte sie beobachten, ob sie sich auch den Lösungsweg merken können, dieselbe Strategie erneut anwenden, wenn sie ein zweites oder drittes Mal auf die verschlossene Box stoßen. Das nämlich wäre ein deutlicher Hinweis auf höhere geistige Fähigkeiten.

„Am Anfang haben sie alle einfach mit der Box herumgespielt, viele verschiedene Strategien ausprobiert“, schildert die Forscherin. Mit der Zeit kamen dabei die meisten tierischen Versuchsteilnehmer auf die Lösung – und konnten den Erfolg später auch wiederholen. „Die Hyänen, die in der Natur das komplexeste Sozialverhalten zeigen, waren am Ende tatsächlich am besten darin, die Box zu öffnen“, berichtet die Forscherin. „Die Löwen, ebenfalls eine soziale Art, haben am zweitbesten abgeschnitten, die Leoparden nicht ganz so gut und die Tiger am schlechtesten.“ Möglicherweise lassen sich diese Ergebnisse als Hinweis darauf verstehen, dass die Soziale-Intelligenz-Hypothese tatsächlich zutrifft, sozialere Spezies also besser darin sind, an-

„Mein Vater und ich lieben Tiere ebenso wie die Stille.“



FOTO: INES JANAS / MPG

Seit zehn Jahren lebt Natalia Borrego mit der Dänischen Dogge Lysander. Benannt hat die Forscherin ihren Hund nach einer Figur aus Shakespeares *Mittsommernachtstraum*: dem leidenschaftlichen Lysander, der durch Mut und Ehrlichkeit besticht.

spruchsvolle Aufgaben zu lösen. Sicher sagen lässt sich das jedoch nicht – unter anderem, weil Natalia Borrego das Experiment nur mit einigen wenigen Individuen durchführen konnte.

Schwer zu interpretieren sind die Ergebnisse auch deshalb, weil selbst nah miteinander verwandte Arten jeweils ganz bestimmte Stärken und Schwächen mitbringen – in Abhängigkeit davon, welche ökologische Nische sie besetzen. Salopp gesagt kann ein nachtaktives Tier im Dunkeln in der Regel besser sehen als ein tagaktives, ein Fluchttier schneller rennen als ein Tier mit Schutzpanzer, ein Baumbewohner besser klettern als ein Bodenbewohner. Je nachdem, welche konkrete Aufgabe man unterschiedlichen Arten stellt, wird der

**„Einzelgänger
können sich
einem
unbekannten
Objekt nicht so
gefahrlos
näher wie ein
Tier, das in
Gruppen lebt.“**

Leistungsvergleich also höchst unterschiedlich ausfallen. „Es könnte sein, dass Tiger bei einer anderen Denksportaufgabe viel besser abgeschnitten hätten als Löwen oder Hyänen“, betont die Forscherin. Dass sie die Puzzlebox vergleichsweise schnell links liegen ließen, könnte jedoch durchaus mit ihrer solitären Lebensweise zusammenhängen. „Viel Zeit in etwas zu investieren, ist kostspielig, weil den Tigern so möglicherweise eine andere Beute entgeht“, mutmaßt Natalia Borrego. „Ebenfalls für denkbar halte ich, dass Tiger insgesamt weniger risikobereit sind als Hyänen und Löwen: Da sie Einzelgänger sind, können sie sich einem unbekannten Objekt nicht so gefahrlos nähern wie ein Tier, das in Gruppen lebt.“

Auch wenn sich die Soziale-Intelligenz-Hypothese durch das Experiment weder bestätigen noch widerlegen ließ: Für Natalia Borrego war schnell klar, dass sie weitermachen und dabei so viel Zeit wie möglich auf dem afrikanischen Kontinent verbringen wollte. Also blieb sie, suchte als Postdoktorandin in einem Projekt zum Verhalten wilder Elefanten nach lokalen Lösungen für Tier-Mensch-Landnutzungskonflikte. Zeitgleich erkundete die Tierliebhaberin die örtlichen Wildtierreservate und stieß dabei auf Gleichgesinnte – unter anderem auf den Biologen Craig Packer und dessen Doktorandin Meredith Palmer. „Gemeinsam haben Meredith und ich dann alle möglichen Experimente zum Jagdverhalten von Löwen geplant und durchge-

führt – einfach weil uns das wahnsinnig interessiert hat“, erinnert sich Natalia Borrego und lächelt. „Größtenteils sind wir dabei allerdings kläglich gescheitert.“

Herausfinden wollten die beiden Forscherinnen, wie genau Löwen sich bei der Jagd koordinieren. So deuten Beobachtungsstudien darauf hin, dass die Großkatzen spezialisierte Rollen einnehmen – ungefähr so wie professionelle Spieler auf einem Fußballfeld. Um das Verhalten live zu beobachten, fertigte Natalia Borrego lebensgroße Pappattrappen von Beutetieren an. „Wir hofften, dass die Löwen diese 2D-Attrappen angreifen würden. Und genau das taten sie dann auch: Sie krachten in die Pappe, wurden sehr wütend und ignorierten unsere Attrappen von da an komplett.“ Für einen zweiten Anlauf besorgte Natalia Borrego ein

lebensgroßes Impala aus Gummi, befestigte dieses auf einer hölzernen Plattform auf Rädern und band diese an einem Jeep fest. „Meredith und ich sind damit an

→



Fährtenleser vom Stamm der San helfen Natalia Borrego dabei, das Jagdverhalten von Löwen und anderen Raubtieren auf dem afrikanischen Kontinent im Detail nachzuvollziehen. Anhand von Tatzenabdrücken und anderen Spuren rekonstruieren die San, wo eine Jagd stattgefunden hat und wie sie abgelaufen ist.

FOTO: CRAIG PACKER

46

den Löwen vorbeigefahren und haben Gas gegeben, damit sie uns hinterherrennen. Das hat dann auch wunderbar funktioniert, nur leider haben sie das Gummi-Impala dabei so vollständig zerstört, dass wir das Experiment nicht wiederholen und die Daten nicht verwenden konnten.“

Entmutigen ließ sich Natalia Borrego von den amüsanten Misserfolgen nicht: Sie nahm eine Stelle als Assistenzprofessorin an der New York University an, wechselte an die American University in Kairo und setzte ihre Studien zum Jagdverhalten von Löwen fort. Durch eine Bekannte wurde sie hierbei auf die NGO „Leopard Ecology & Conservation“ in Botswana aufmerksam, die Daten zu Großkatzenverhalten mithilfe von Fährtenlesern aus dem Volk der San erhebt. „Diese Menschen haben unglaubliche Fähigkeiten: Sie ermitteln anhand von Tatzenabdrücken und anderen Spuren, wo genau eine Jagd stattgefunden hat, wie sie abgelaufen ist und wie viele Löwen und Beutetiere daran beteiligt waren.“ Wie genau all das funktioniert, ließ sich Natalia Borrego vor Ort in Botswana von der britischen Löwenforscherin Genevieve Finerty erklären, die bereits seit einer Weile mit den San kooperierte. „Gen und ich haben uns sofort sehr gut verstanden, gemeinsam viele Touren unternommen und dann angefangen, zusammen Projekte zu machen.“ Es war der Startschuss für eine fruchtbare Zusammenarbeit, die bis heute fortbesteht.

Und eine weitere schicksalhafte Begegnung fällt genau in diese Zeit: In Südafrika traf Natalia Borrego auf ihren späteren Mann, einen Reservatmanager. Der zunächst eher spröde und schweigsame Logistikexperte,

half ihr bei einer Versuchsreihe – ausgerechnet mit dem Kuschel- und Bindungshormon Oxytocin. „Wir sprühten Löwen Oxytocin in die Nase, um zu testen, ob sich dadurch ihr Verhalten ändert.“ Schrittweise kamen sich die beiden dabei näher. „Bis heute scherzen mein Mann und ich, dass wir uns mit dem Oxytocin sozusagen in die Liebe hineingedopt haben“, sagt Natalia Borrego und lacht. „Komischerweise hat es damals aber niemanden außer uns beiden erwischt, und die Liebe hält bis heute an.“ Mehrere Jahre führten sie eine Fernbeziehung zwischen Südafrika, den USA und Ägypten, konnten sich infolge der Pandemie über Monate nicht sehen und mussten ihren Hochzeitstermin ganze fünf Mal verschieben. Dann aber war es endlich so weit: Zuerst in den USA, dann in Südafrika gaben die beiden Tierfreunde sich das Jawort – inmitten von Zebras. Heute leben sie zusammen mit Hund und Kind in Konstanz und brechen abwechselnd zu Reisen auf – ihr Mann als Forschungsassistent, Natalia Borrego als Forscherin.

Dass es das Paar schlussendlich nach Deutschland verschlagen hat, ist einer Ausschreibung des Max-Planck-Instituts für Verhaltensforschung zu verdanken. „Gesucht wurden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die im Team nach neuen Erkenntnissen zu Tiersozialverhalten suchen“, erklärt die Forscherin. Eine Projektausschreibung wie gemacht für das Forschungsduo Natalia Borrego und Genevieve Finerty. Sie bekamen den Zuschlag, zogen 2021 nach Konstanz und führen ihre Löwenforschung seither in der von Meg Crofoot geleiteten Abteilung für Ökologie der Tiergesellschaften fort. Nach wie vor wollen die beiden herausfinden, wie Löwen ihr Jagdverhalten und das

Leben in der sozialen Gruppe koordinieren. Zugleich ist ihr Ziel zu bestimmen, wie stark sich unterschiedliche Populationen voneinander unterscheiden. In verschiedenen Ländern erhobene Daten deuten so darauf hin, dass der Lebensraum maßgeblich beeinflusst, wie Löwen ihren Alltag bestreiten.

„Das meiste, was wir heute über Löwen wissen, haben Forschende in der Serengeti beobachtet“, erklärt Natalia Borrego. „Das ist eine sehr beutereiche Umgebung, in der die Tiere Territorien von 50 bis 100 Kilometer Durchmesser besetzen. In Gebieten, in denen es weniger Beute gibt, legen Löwen aber auch schon mal Tausende Kilometer zurück – in Botswana zum Beispiel. Häufig sieht man dann, dass sie dort in deutlich kleineren Gruppen leben und insgesamt ein anderes Verhalten zeigen.“ Um möglichst viele Populationen miteinander vergleichen zu können, statten Natalia Borrego und Genevieve Finerty die Löwen mit Halsbändern aus, die GPS-Koordinaten und Audiodaten erfassen und diese über Satellit nach Konstanz funken. So gewinnen die Wissenschaftlerinnen Langzeitdaten, erstellen Bewegungsprofile. „Bei all dem ist uns sehr wichtig, die Menschen vor Ort in unsere Forschung einzubeziehen“, betont Natalia Borrego. „Sie sind die Experten, helfen uns bei unseren Vorhaben. Ohne Menschen wie die Fährtenleser vom Volk der San könnten wir unsere Experimente gar nicht durchführen.“

Letztere begeben sich regelmäßig für die beiden Forscherinnen ins Feld, finden dort heraus, welchen Beutetieren die Löwen in welchem Tempo und in welcher Körperhaltung auf den Fersen waren. „Häufig findet die Jagd im hohen Gras statt, und alles passiert sehr schnell. So ist es für uns fast unmöglich, die Vorgänge auf technischem Weg verlässlich mitzuschneiden“, erklärt Natalia Borrego. Mit Unterstützung der Fährtenleser jedoch, die sie als Co-Autoren in ihren Studien aufführt, kann die Forscherin das Geschehen im Detail nachvollziehen. „Wenn die Tiere ungewöhnlich lange an einem Ort verweilen – das sehen wir anhand der GPS-Daten aus den Halsbändern –, liegt es oft daran, dass sie Beute gemacht haben. Die San suchen dann den Kadaver und schreiten die Wege ab, die Löwen und Beutetiere zuvor genommen haben.“ Die Daten erfassen die indigenen Fährtenleser mithilfe eines Senders, den sie währenddessen

in der Hand halten. „Dadurch können wir das Jagdverhalten räumlich rekonstruieren.“

Hierbei zeigt sich: Die botswanischen Löwen verhalten sich anders als ihre Verwandten in der Serengeti. „Leichte Beute erlegen Löwen in der Serengeti oft allein. Versuchen sie dagegen, besonders schnelle oder gefährliche Beute zu reißen, schließen sie sich zu Gruppen zusammen“, erklärt Natalia Borrego. „Im Khutse Game Reserve in Botswana aber gehen Löwen überwiegend allein auf die Jagd – egal welcher Tierart sie nachstellen.“ Giraffen, Elenantilopen und Spießböcke: Selbst Beutetiere, die Löwen mit ihren Hufen problemlos den Garaus machen können, bringen die botswanischen Raubkatzen alleine zur Strecke. „Es scheint, dass jeweils ein erwachsenes Weibchen mit den Jungtieren zurückbleibt, während ein anderes auf die Jagd geht. Hinterher wird die Beute geteilt.“ Hintergrund ist womöglich die geringe Wilddichte in der Region. „Vielleicht müssen die Löwen hier schlicht jede Gelegenheit nutzen, weil sie sonst Gefahr laufen zu verhungern“, vermutet Natalia Borrego.

Etwa vier Jahre hat es gedauert, mithilfe der San rund 200 solcher Jagdvorgänge in der kargen Landschaft Botswanas zu rekonstruieren – eine Sisypheaufgabe. Natalia Borrego jedoch lässt sich nicht entmutigen, will auch in den kommenden Jahren weiter im großen Stil Daten zu Löwenverhalten in unterschiedlichen Ländern erheben. Auf lange Sicht hofft sie, zu einem Gesamtbild zu kommen und so dann valide Aussagen über Verhaltensdiversität und Gruppenorganisation machen zu können. Noch zwei weitere Jahre wird sie diese Experimente von Konstanz aus koordinieren. Danach hofft sie auf eine feste Stelle als Gruppenleiterin – am liebsten im Team mit Genevieve Finerty und weiteren Mitstreitenden. „Ich glaube, ich bin einer dieser Menschen, die niemals in Rente gehen werden – dazu habe ich einfach zu viel Freude an meinem Beruf“, resümiert die Wissenschaftlerin und lächelt. Sollte sie sich doch einmal dazu genötigt fühlen, dann würde sie ihren Lebensabend gern in einem Haus mit Pool in einem Wildtierreservat verbringen – in der Natur also, umgeben von Wildtieren. „Mit einem Buch und einem Glas Wein auf der Terrasse sitzen und den vorbeiziehenden Tieren zusehen – das ist für mich Glück.“

←

**„Ohne die
Fährtenleser
könnten wir
unsere
Experimente
gar nicht
durchführen.“**

VOM PRÄSIDENTEN

48



Patrick Cramer,
Präsident der Max-Planck-Gesellschaft

ILLUSTRATION: SOPHIE KETTERER FÜR MPG

Europas Chance in der globalen Wissenschaft

Drei Jahre bin ich nun als Präsident der Max-Planck-Gesellschaft im Amt. Seitdem hat sich die Welt der Wissenschaft durch geopolitische Veränderungen stark gewandelt. Die andauernden Angriffe auf die Wissenschaft in den USA und der rasante Aufstieg Chinas als Technologiesupermacht stellen uns erneut vor die Frage: Welche Rolle können und sollten wir in der Welt spielen – als Max-Planck-Gesellschaft und als europäische Wissenschaftsorganisation?

Fest steht: Internationalität ist eine Grundlage von Spitzenforschung. Die Max-Planck-Gesellschaft ist in besonderem Maße international. Bei uns arbeiten mehr als 10000 Forschende aus über 130 Ländern. Wir sind weltweit vernetzt, mit über 2500 Kooperationen in Europa, rund 1000 in den USA und einer stetig wachsenden Zahl in Asien, Südamerika und Afrika. Wir kooperieren dann, wenn Forschung möglich wird, die keine Seite allein leisten könnte, oder wenn eine Zusammenarbeit uns Zugang zu einzigartigen Infrastrukturen eröffnet. Wichtig ist dabei, dass wir keine unvermeidbaren Risiken eingehen. Dafür haben wir interne Prozesse.

Wissenschaft ist ein weltweites Unterfangen. Sie ist kein isoliertes, nationales Projekt. Ihre Stärke liegt gerade in ihrer globalen Natur. Erst das Wechselspiel von grenzüberschreitendem Wettbewerb und Kooperation bringt verlässliche Ergebnisse hervor – und beschleunigt den Fort-

schritt. Grundlage dafür ist eine Wissenschaftskultur mit gemeinsamen Regeln, offenem Datenaustausch und fortlaufender Selbstkontrolle.

Dieses globale Wissenschaftssystem ist derzeit gefährdet. Isolationistische Tendenzen in den USA und in China treiben die Aufspaltung der angloamerikanisch geprägten Wissenschaftskultur, wie wir sie kennen, in geopolitische Sphären mit unterschiedlichen Standards voran. Sowohl in den USA als auch in China bestimmen zunehmend Macht-, Sicherheits- und Wirtschaftsinteressen die Wissenschaftspolitik.

Auf beiden Seiten werden Forschungsprojekte ideologisiert, der Zugang zu Forschungsdaten erschwert und internationale Kooperationen eingeschränkt. China stellt sukzessive auf staatliche Publikationsplattformen um; die US-Regierung will das zentrale Instrument der wissenschaftlichen Selbstkontrolle, den Peer-Review, durch Zensur ersetzen. Was droht, ist eine Fragmentierung: die Aufspaltung der Wissenschaft entlang geopolitischer Linien.

Welche Rolle soll Europa in dieser neuen Welt der Wissenschaft übernehmen? Meine Position ist klar: Europäische Wissenschaftsinstitutionen dürfen sich nicht in die Logik der Blockbildung drängen lassen. Im Gegenteil: Wir sollten der drohenden Fragmentierung der globalen Wissenschaft aktiv entgegenwirken, soweit dies in unseren Möglichkeiten liegt.

Ein Schlüssel dazu ist Multilateralismus: Wenn wir unsere Stärke darin nutzen, kann die gegenwärtige Situation eine Chance für uns in Europa sein. Indem wir auf risikoarmen Feldern mit vielen Part-

nern zusammenarbeiten, können wir zu einem Knotenpunkt internationaler Forschung werden. Wir sollten die transatlantische Zusammenarbeit festigen, die Kooperation mit China in risikoarmen Bereichen ausbauen – und neue Partner finden.

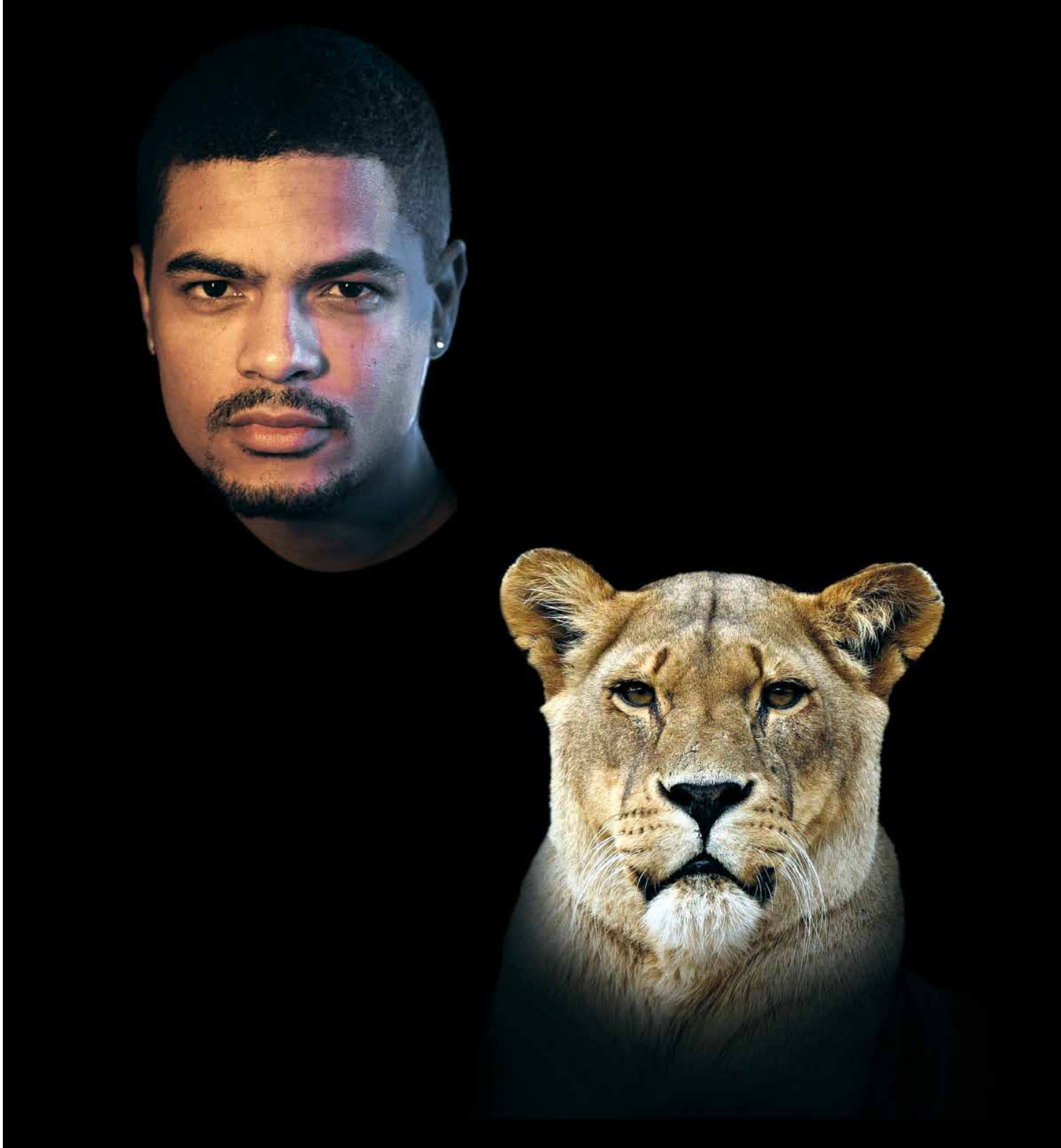
Wie lässt sich das konkret umsetzen? Die Max-Planck-Gesellschaft eröffnet in diesem Jahr sieben neue Max Planck Center mit führenden US-Institutionen und baut gleichzeitig acht Zentren in Asien auf, und zwar nicht nur in China, sondern auch in Indien, Singapur, Südkorea und Taiwan. Darunter sind auch Kooperationszentren, die Partner aus mehreren Ländern und sogar Kontinenten miteinander verbinden. Durch solche Kooperationen kann die Wissenschaft in Europa als Brückenbauer wirken und weltweit an Einfluss gewinnen.

Damit das gelingen kann, bleibt nicht nur ein effektives „De-Risking“, sondern gerade auch die Attraktivität unseres Standorts Europa entscheidend. Es gilt, die nachhaltige Leistungsfähigkeit europäischer Wissenschaftsinstitutionen zu stärken und einer politischen Vereinnahmung der Wissenschaft auch bei uns entgegenzuwirken. Zudem müssen wir die Werte verteidigen, die das Wissenschaftssystem in Europa auszeichnen. Wir stehen für Freiheit, Offenheit und Vielfalt. Das wird im globalen Wettbewerb immer wichtiger. Die Talentströme verschieben sich, und wir profitieren davon, dass derzeit mehr herausragende Köpfe zu uns nach Europa kommen. Diese historische Chance sollten wir mutig ergreifen.

49

←

ZWEITER BLICK



50

MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR EMPIRISCHE ÄSTHETIK

Löwen haben majestätische Mähnen, Pfauen schlagen prächtige Räder, Hirsche tragen imposante Geweihe: Im Tierreich sind es meist die Männchen, die mit ihrem Aussehen auffallen. Beim Menschen dagegen gelten Frauen als das „schöne Geschlecht“. Ist das nur ein Klischee? Eine empirische Studie mit mehr als



28 500 Menschen und über 1,5 Millionen Bewertungen zeigt: Gesichter von Frauen werden im Durchschnitt als attraktiver wahrgenommen als die von Männern – unabhängig von Alter, Kultur oder Herkunft. Ein erheblicher Teil dieses „Gender Attractiveness Gap“ lässt sich durch Unterschiede in der Gesichtsstruktur erklären. Doch sie sind nicht alles: Biologische Merkmale, individuelle Bewertungsmuster und soziale Einflüsse prägen, was wir als attraktiv empfinden.

Ein bisschen Frieden

Als „Die Hippies unter den Menschenaffen“ (*Die Welt*) und „Affen im Garten der Lüste“ (*Süddeutsche Zeitung*) sind Bonobos schon bezeichnet worden, weil sie so friedfertig scheinen und Sex zur Lösung von Konflikten einsetzen. Barbara Fruth und ihr Team vom Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie in Konstanz erforschen seit vielen Jahren das Sozialleben der Menschenaffen. Dabei haben sie entdeckt, dass es auch bei den Bonobos zu Ausbrüchen von Gewalt kommen kann.

Text: Catarina Pietschmann

FOTO: CHRISTIAN ZIEGLER / MPI FÜR VERHALTENSBIOLOGIE

Vor zwei Jahren wurde Sonya Pashchevskaya, Doktorandin im Forschungsteam von Barbara Fruth, im Regenwald der Demokratischen Republik Kongo Zeuge eines mörderischen Zwischenfalls: Das Opfer war Hugo, ein ausgewachsenes Männchen. „Fünf Weibchen –

Polly, Tao, Ngola, Djuile und Bella – sprangen abwechselnd auf den Rücken von dem am Boden liegenden Hugo und stampften darauf herum. Sie bissen ihn in Kopf, Beine, Hals, Finger, Zehen und Hoden. Während des gesamten Angriffs bedeckte Hugo seinen Kopf mit den Hän-

den und stieß monotone Stresslaute aus. Als sein Körper besser sichtbar wurde, stellten die Beobachter fest, dass auch sein Gesicht entstellt war und er an Kopf, Schultern und Rücken viel Fell verloren hatte ...“, schreibt Pashchevskaya zusammen mit Barbara Fruth und deren Mann

WISSEN AUS

BIOLOGIE UND MEDIZIN

53

Bonobo-Mütter kümmern sich liebevoll um ihren Nachwuchs. Wenn sie ihren Säugling viele Stunden lang umhergetragen haben, genießen sie eine gemeinsame Ruhepause, bevor sie mit der Fellpflege beginnen oder ausgelassen spielen.

und Forschungskollegen Gottfried Hohmann später dazu. Und weiter: „Etwa 25 Minuten hatten die ununterbrochenen Angriffe gedauert, die der Rest der Bonobo-Kommune still aus einigen Metern Entfernung beobachtet hatte. In den folgenden eineinhalb Stunden leckten An-

greifer und Unbeteiligte das Blut von Hugos Körper und seine Wunden. Danach zerstreute sich die Gruppe.“ Hugo schaffte es noch, sich auf seine malträtierten Knöchel zu stützen und davonzulaufen, wurde aber nie wieder gesichtet. Wahrscheinlich erlag er seinen schweren

Verletzungen. Solche Beobachtungen kennt man eigentlich nur von Schimpansen. Denn während die Bonobos als friedfertig und sanftmütig gelten, stehen Schimpansen im Ruf, aggressiver und gewalttätiger zu sein. So fechten männliche Schimpansen untereinander Rankämpfe



Bei Schimpansen kommt es immer wieder zu gewalttätigen Auseinandersetzungen. Anders als bei den Bonobos gehen bei ihnen Aggressionen meist von den Männchen aus. Die Tiere können dabei ernsthaft verletzt oder sogar getötet werden.



54 aus und führen mit Angehörigen anderer Gruppen regelrechte „Kriege“. Und auch Schimpansen-Weibchen lösen Konflikte mitunter mit Gewalt.

Friedliches Leben im Zoo

Spätestens nach dem Mord an Hugo erschienen auch die Bonobos nicht mehr so friedfertig wie gedacht. „Das Bild von den friedfertigen Bonobos ist ein Klischee, das durch die Beobachtung junger Bonobos und Schimpansen im Zoo entstanden ist“, erklärt Barbara Fruth, Leiterin einer Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie. „Im Zoo verhalten sich Tiere aber anders als in ihrer natürlichen Umwelt.“ In Gefangenschaft spielen Bonobos zum Beispiel häufiger als im Regenwald, wo sie mehr Zeit für die Futtersuche und Nahrungsaufnahme aufwenden müssen. Auch Schimpansen sind im Zoo friedlicher.

Bonobos wirken zwar etwas graziler, sind ansonsten äußerlich aber kaum von Schimpansen zu unterscheiden. Lange Zeit hielt man sie deshalb für etwas klein geratene Schimpansen. Erst vor knapp

100 Jahren wurden die Tiere anhand ihrer Schädelmerkmale als eigenständige Art erkannt. Bonobos leben in einem Teil des Kongobeckens, der vom Lebensraum der Schimpansen durch den kilometerbreiten Strom des Kongo getrennt ist. Seit 1990 hat Barbara Fruth zusammen mit ihrem Mann zwei Forschungsstationen im Regenwald der Demokratischen Republik Kongo aufgebaut, um das Verhalten der Tiere zu erforschen. Ihre Forschungsergebnisse belegen, dass das Sozialleben der Bonobos weniger auf Aggression als auf friedlichen sozialen Kontakten zwischen Individuen beruht. Eine wichtige Komponente ist dabei das Berühren und Reiben der Genitalschwellungen der Weibchen untereinander. Dieses Verhalten hat den Ruf der „liebestollen“ Bonobos begründet. Die Tiere tauschen dabei aber keine erotischen Zärtlichkeiten aus, sondern sie festigen damit soziale Bindungen und die Rangordnung in der Gruppe. Deshalb wird das Verhalten auch „Soziosex“ genannt.

„Jeder, der einer Bonobo-Gruppe folgt, ist beeindruckt von ihrer zugewandten, empathischen Art“, erzählt Fruth. Morgens verlassen sie ihre Nester und essen erst einmal ausgiebig. Danach ruhen sich die Tiere zwei Stunden aus – Zeit, in der die

Gruppenmitglieder sich intensiv miteinander beschäftigen. „So wie wir uns unterhalten, lausen sie sich das Fell. Die Kinder spielen ausgelassen miteinander und mit den Erwachsenen. Und dann geht es gemächlich weiter.“ Auf einen unbedarften Beobachter wirkt das Leben der Bonobos leicht wie ein nie endender Urlaub.

Auch die Beziehungen von Menschen- und Bonobo-Müttern zu ihren Kindern sind einander sehr ähnlich. Autoritäre Erziehung kennen die Menschenaffen allerdings nicht, denn Bonobo-Mütter sind extrem tolerant – auch dann noch, wenn sie den ganzen Tag den Nachwuchs mit sich herumgetragen haben und wirklich müde sind, und die Kinder dann anfangen, neben ihnen Purzelbäume zu schlagen. „Von ihrer Geduld und Zugewandtheit können wir uns eine dicke Scheibe abschneiden“, sagt die Verhaltensforscherin. Auch die Männchen spielen mit den Kindern während der Siesta und ermöglichen damit den Weibchen etwas Ruhe.

Solche Erkenntnisse sind nur durch jahrelange geduldige Vorarbeit möglich geworden, in der die Tiere an die Anwesenheit von Menschen gewöhnt wurden: Während dieser Gewöhnungsphase brechen die Forschenden vor Tagesanbruch aus



FOTO: IMAGO / IMAGEBROKER / MORITZ WOLF

Auf den Punkt gebracht

Bonobos verhalten sich Artgenossen gegenüber zwar meist weniger aggressiv als Schimpansen. Aber auch den Bonobos ist Gewalt nicht fremd.

Insbesondere die Weibchen bilden manchmal Koalitionen und gehen gegen einzelne Männchen vor, möglicherweise um ihre Jungen zu schützen.

Die unterschiedlichen Sozialsysteme der verschiedenen Menschenaffen-Arten sind im Laufe der Evolution unter anderem als Reaktion auf die jeweiligen Umweltbedingungen entstanden, unter denen eine Art lebt. Das Wissen darüber hilft, die Evolutionsgeschichte unserer eigenen Art zu rekonstruieren.

ihrem Camp auf, um am Schlafplatz der Bonobo-Gruppe zu sein, bevor diese mit ihrer Morgentoilette beginnt. Den ganzen Tag über begleiten sie die Tiere, bis sich diese am Abend in ihre Schlafnester zurückziehen. Frühestens nach drei Jahren können sich die Forschenden einem Tier dann bis auf sieben Meter nähern,

ohne beachtet zu werden. Über die Jahre beobachteten Fruth und ihr Team, dass den Bonobos aggressives Verhalten nicht fremd ist. Aggressionen kommen sogar ähnlich häufig vor wie bei Schimpansen, sie sind nur nicht so intensiv und gehen häufiger von den Weibchen als von den Männchen aus. Das hat auch damit zu tun, dass bei Bonobos anders als bei Schimpansen die Weibchen dominant sind. „Bei den Schimpansen attackieren Männchen sowohl andere Männchen als auch Weibchen. Bei den Bonobos sind es die Weibchen, die auf Männchen losgehen. Anders als bei den Schimpansen kommt es dabei aber selten zu ernsthaften körperlichen Verletzungen“, sagt Fruth.

Manchmal passiert dies aber doch: Schon drei Jahrzehnte vor dem eingangs beschriebenen Gewaltausbruch gegen Hugo hatten die Forschenden etwas beobachtet, was so gar nicht ins Bild passte: Volker, der Sohn des ranghöchsten Weibchens, wurde von einer kleinen Gruppe Weibchen angegriffen, schwer verletzt und wahrscheinlich getötet. Und Volkers Mutter stand tatenlos daneben und ließ es geschehen. Hätten die Forschenden nicht eingreifen und Volker und Hugo helfen können? „Wenn wir uns einmischen, wären wir keine neutralen Beobachter mehr. Außerdem wäre es lebensgefährlich, in eine solche Auseinandersetzung zu geraten, denn Bonobos sind deutlich stärker als wir Menschen und besitzen ein wehrhaftes Gebiss mit beeindruckenden Eckzähnen.“

Warum kam es zu dem Gewaltexzess gegenüber Hugo? Fruth vermutet, dass sich das Männchen aggressiv gegenüber einem Jungtier verhalten haben könnte. Eine Woche zuvor war Hugo dabei beobachtet worden, wie er an einem Jungtier eines der beteiligten Weibchen zog, während er sich mit der Mutter paarte. Daraufhin wehrte diese sich, ohne ihn zu verletzen. Eine Woche nach diesem Vorfall hatte Hugo offenbar eine rote Linie überschritten: Die Weibchen verbündeten sich, um ihn auf brutale Weise in die Schranken zu weisen. Die Forschenden vermuten, dass dem beobachteten geballten Angriff der Weibchen eine weitere ähnliche Attacke gegen das Junge vorausgegangen sein könnte. „Bonobos können weit über 50 Jahre alt werden und haben ein sehr gutes Gedächtnis. Vielleicht ist es ja notwendig, alle paar Jahrzehnte ein solch

grausiges Exempel zu statuieren, um zu zeigen, wer das Sagen hat?“ In den allermeisten Fällen beschränken sich Auseinandersetzungen bei Bonobos jedoch auf Schreien, Rennen und Verjagen.

Das Sozialverhalten und die Beziehungen zwischen den Geschlechtern ist bei den Menschenaffen also außerordentlich vielfältig: Weibliche (Bonobos) und männliche (Schimpansen) Dominanz, Harems (Gorillas), feste (Gibbons) und lockere (Orang-Utans) Paarbeziehungen – so ziemlich jedes Beziehungsmodell scheint unter bestimmten Voraussetzungen seine Vorteile zu haben. Welche das im Einzelfall sind, ist noch nicht restlos geklärt. Früher wurde eine angeblich vegetarische Ernährung der Bonobos angeführt, um deren Friedfertigkeit zu erklären. Dabei ist Fleisch ein wichtiger Bestandteil ihrer Ernährung. Vor allem die Weibchen sind geschickte Jägerinnen und erbeuten sogar andere Affenarten.

Allianzen unter den Weibchen

55

Ein Grund dafür, dass bei den Bonobos die Weibchen dominant sind, könnte sein, dass es in ihrem Lebensraum Nahrung im Überfluss gibt. Die Region wird nicht umsonst „Salatschüssel“ genannt, denn es gibt hier das ganze Jahr über am Boden reichlich krautige Vegetation. So können auch Mütter mit ihrem Nachwuchs auf dem Weg von einem Futterbaum zum nächsten in aller Ruhe fressen, ohne abgehängt zu werden. Harte Konkurrenz um Futter besteht also nicht. In den Lebensräumen von Schimpansen ist das nicht immer so. Bonobos können deshalb enge Bindungen miteinander aufbauen – und das, obwohl die meisten Weibchen einer Gruppe nicht miteinander verwandt sind, denn im Teenager-Alter schließen sich weibliche Bonobos genau wie Schimpansinnen anderen Gruppen an. Gemeinsam gelingt es ihnen dann, sich gegen die Männchen durchzusetzen. Aber könnten nicht auch die Männchen Koalitionen bilden? Schließlich sind sie im Gegensatz zu den Weibchen sogar miteinander verwandt. „Warum die Männchen das nicht tun, die Weibchen aber schon – das widerspricht der Logik der Biologie. Bei den Schimpansen ist es genau so, wie man es erwartet: Da verbünden sich die miteinander



ander verwandten Männchen, und die nicht verwandten Weibchen haben wenig miteinander zu tun“, erklärt Fruth. Ein Grund könnte im knapperen Futterangebot liegen, das weibliche Schimpansen oft dazu zwingt, alleine auf Nahrungssuche zu gehen. Außerdem teilen sich Schimpansen oft ihren Lebensraum mit Gorillas. Dies erhöht die Konkurrenz um Nahrung. Bindungen bauen unter diesen Umständen vor allem die Männchen aus. Ein Grund für die weibliche Dominanz bei Bonobos könnte auch sein, dass die Männchen nicht sicher sein können, wann ein Weibchen fruchtbar ist. Denn während bei den Schimpansen eine auffällige Schwellung der Genitalien zuverlässig anzeigt, wenn ein Weibchen seinen Eisprung hat, ist dies bei weiblichen Bonobos nicht immer der Fall. „Wahrscheinlich hilft den männlichen Bonobos deshalb Gewalt und Dominanz nicht, wenn sie sich fortpflanzen wollen. Stattdessen setzen sie auf gute Beziehungen.“ Mit ihrer Forschung wollen Barbara Fruth und ihr Team nicht nur das Wissen über Menschenaffen mehren. Sie wollen auch dazu beitragen, die Bonobos und deren Lebensraum zu schützen. Bonobos gehören neben Elefanten zu den wichtigsten „Gärtnern des Regenwaldes“. Beide Arten zusammen verbreiten Samen von über 350 Pflanzenarten und forsten so permanent den Wald auf. Es sind vor allem diese unbezahlbaren Ökosystemleistungen, die Bonobos für den Regenwald so wertvoll machen. „Wenn sie fehlten, würde sich die Zusammensetzung des Regenwaldes komplett verändern.“

Der Klimawandel ist jedoch auch im Regenwald angekommen. Regen- und Trockenzeiten werden weniger vorhersagbar, die Schwankungen und Intensität von Gewittern und Regenfällen nehmen zu. Die Verteilung, Menge und Qualität an Nahrung wird damit unzuverlässiger und führt dazu, dass die Tiere immer größere Strecken zurücklegen müssen, um ihren Nahrungsbedarf zu decken. Eine weitere Bedrohung ist der Verlust von Lebensraum durch das Abholzen des Regenwaldes. Außerdem bedroht die wachsende Nachfrage nach Buschfleisch das Ökosystem des Waldes. Bonobos, aber auch viele andere Säugetiere wie Elefanten, Antilopen, andere Affen, Schleichkatzen, Flughunde und zahlreiche Nagetiere sind unerlässlich für den Fortbestand des Regenwaldes, denn sie verbreiten die Samen

unzähliger Pflanzen. Dadurch sorgen sie dafür, dass sich der Wald fortlaufend erneuern kann. Jahrtausendlang haben die Menschen im Regenwald gerade so viele Tiere gejagt, wie sie für sich selber benötigten. „Heute ist Wildfleisch die lukrativste Einnahmequelle in unserer Region. Und mit Drahtschlingen und Schrotflinten können die Menschen viel mehr Tiere erlegen, als sie selbst zum Sattwerden brauchen“, sagt Fruth. Die Jäger verkaufen das Fleisch an Händler, die es auf die Märkte in Großstädten wie Kinshasa bringen. Die Nachfrage ist so hoch, dass Buschfleisch selbst in Brüssel in afrikanischen Restaurants zu bekommen ist.

Verein für den Schutz der Bonobos

Aufgeben kommt für Barbara Fruth jedoch nicht infrage. Schon als junge Greenpeace-Aktivistin hat sie Fassaden erklettert und auf Umweltprobleme aufmerksam gemacht. Um die Bonobo-Population und ihren Lebensraum zu schützen, hat sie gemeinsam mit ihrem Mann und fünf weiteren Forschenden „Bonobo Alive e.V.“ gegründet. Der Verein setzt sich für den Schutz der Bonobos ein: Er führt zusammen mit der kongolesischen Naturschutzbehörde Antiwilderei-Patrouillen durch und investiert in Bildung, indem er den Bau von Schulen und die Bezahlung von

Lehrerinnen und Lehrern fördert. Darüber hinaus richtet er Informationsveranstaltungen an Schulen aus und organisiert Ausbildungsprogramme für Jugendliche. Auch die Aufklärung über übertragbare Krankheiten, die Bonobos gefährlich werden können, steht auf dem Programm. Für ihr langjähriges ökologisches und soziales Engagement zur Erforschung der scheuen Menschenaffen wurde Barbara Fruth 2025 mit dem Bundesverdienstkreuz ausgezeichnet.

Das Bild von den „Hippies unter den Menschenaffen“ muss also relativiert werden – ganz so friedlich sind die Bonobos dann doch nicht. Lässt sich aus dem Verhalten der Bonobos auch etwas über das des Menschen lernen? Sicher ist: *Homo sapiens* lebte seit seiner Entstehung viele Jahrtausende unter vergleichbaren Umweltbedingungen wie Bonobos und Schimpansen heute. Die beiden Arten sind daher Modelle dafür, wie Umweltzwänge bestimmte Verhaltensweisen fördern und welche sich davon dauerhaft bewährt haben. Wenn wir diese Zusammenhänge besser verstehen, lässt sich vielleicht auch die Frage klären, wie das Verhalten von *Homo sapiens* ursprünglich ausgesehen hat. Das Beispiel der Bonobos zeigt: Weitgehende Gewaltfreiheit wäre eine Option gewesen!



Während sich die Mitglieder einer Bonobo-Gruppe gegenseitig das Fell pflegen, gibt Barbara Fruth die Ortskoordinaten ins Camp durch, damit das nächste Beobachtungsteam zur Ablösung aufbrechen kann. In der Nähe der Tiere tragen sie und ihr Team Masken, um die Übertragung von Krankheitserregern zu verhindern.

FOTO: CHRISTIAN ZIEGLER / MPI FÜR VERHALTENSBIOLOGIE

WISSENSCHAFT BRAUCHT FREIHEIT – VERMÖGEN EINEN SINN

„Mit dem Vermächtnis meines Mannes
stärkt die Förderstiftung die Forschung
und bringt die Wichtigen
mit den Richtigen
zusammen – leise im
Hintergrund, mit einer
Fürsorge, die durch
alle Lebensphasen
trägt. Dankbar blicke
ich nach vorn.“

Uta Neuhaus *



** Hermann Neuhaus ist unser bisher größter Förderer. Seine mit uns eng verbundene Witwe Uta Neuhaus ist hier mit Nobelpreisträger Stefan Hell zu sehen. Mit seinen beiden Göttinger Ausgründungen ist Professor Hell der perfekte Nachbar des nach Hermann Neuhaus benannten Wohnbauprojekts „NeuHaus“. Denn angewandte Grundlagenforschung war ein besonderes Anliegen des großzügigen Unternehmers.*

Seit 20 Jahren bringen sich unsere Fördernden aktiv für die Forschung ein: für gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Fortschritt. Sie schaffen flexibel und effizient Freiräume, die nur mit privatem Vermögen entstehen. Gemeinsam fördern wir alle, vom Nachwuchswissenschaftler bis zur Nobelpreisträgerin, damit Ideen schnell umgesetzt werden und die Max-Planck-Gesellschaft im internationalen Spitzenfeld wettbewerbsfähig bleibt. Werden auch Sie Teil der Max-Planck-Familie und finden Sie bei uns einen dauerhaften Platz für Ihr Wirken.

Spendenkonto
DE46 7007 0010 0195 3306 00



Antrieb mit
Zukunft:
Batterien sind
die Schlüssel-
technik für die
E-Mobilität. In
E-Autos werden
sie oft in Form
flacher Batterie-
pakete verbaut.

Geballte Ladung

Leistungsfähige und kostengünstige Stromspeicher sind entscheidend, damit die Energieversorgung auf erneuerbare Quellen wie Windkraft und Photovoltaik umgestellt werden kann. Daher sind Batterien Gegenstand der Hightech-Strategie der Bundesregierung, und weltweit – auch an verschiedenen Max-Planck-Instituten – versuchen Forschende, mehr aus Batterien herauszuholen und ganz neue Konzepte zu entwickeln.

Text:
Peter Hergersberg

Es ist ein Rennen, bei dem es mehrere Sieger geben wird. Weltweit arbeiten Wissenschaft und Industrie daran, Batterien immer leistungsfähiger, preiswerter, nachhaltiger und sicherer zu machen. Denn Batterien sind unverzichtbar, wenn es darum geht, von fossilen Brennstoffen wegzukommen und die Energieversorgung auf erneuerbare Quellen, vor allem auf Wind und Sonne, umzustellen. Sie werden für die E-Mobilität und als stationäre Speicher sowohl im Stromnetz als auch in Privathaushalten gebraucht.

Derzeit setzt die Industrie auf verschiedene Batterietypen, und Forschende in der ganzen Welt versuchen, die Stromspeicher

immer besser zu machen. Sie tüfteln aber auch an neuen Konzepten. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an verschiedenen Max-Planck-Instituten beteiligen sich daran mit jeweils speziellem Fokus. Einen umfassenden Blick auf die Batterieforschung hat Joachim Maier, emeritierter Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart. Er hat besonders Batterieprozesse auf der Nanoebene untersucht, die für unterschiedliche Batterietypen relevant sind. Gewissermaßen seine Nachfolgerin ist Raphaële Clément, seit Juli 2026 Direktorin am Stuttgarter Institut. Sie untersucht unter anderem, welche Prozesse in den Elektroden und an den Grenzen zwischen Elektroden und Elektrolyt ablaufen, vor allem solche, die die Batterie schädigen.

Jeder Batterietyp hat seine Vor- und Nachteile. Ein wichtiges Merkmal ist dabei zum einen die Energiedichte bezogen auf die Masse, die ein Maß für die Speicherkapazität darstellt. Zum anderen wird die Güte einer Batterie von der Leistungsdichte bestimmt. Sie gibt an, wie schnell sich eine Batterie laden und entladen lässt.

Aber natürlich spielen auch Sicherheit, Haltbarkeit, die Verfügbarkeit der Materialien und die Kosten eine große Rolle. Raphaële Clément und Joachim Maier sind sich daher einig, wie das Rennen um bessere Batterien ausgehen wird: Für verschiedene Anwendungen wird es unterschiedliche Batterien geben. Denn bei stationären Speichern spielen Gewicht und Volumen keine so große Rolle wie im E-Auto oder Elektrorad, und nicht jedes E-Auto muss eine Reichweite von rund 500 Kilometern schaffen. So weit kommen kommerzielle Fahrzeuge derzeit nur, wenn sie von den momentan leistungsfähigsten und verbreitetsten Batterien angetrieben werden:

Lithium-Ionen-Batterien

Sie sind heute erste Wahl als Stromspeicher in Elektrofahrzeugen, aber auch in stationären Anwendungen. Sie heißen so, weil in ihnen beim Entladen und Laden Lithiumionen zwischen Minus- und Pluspol durch

Gut und sicher verstaut: Die Batteriepakete von E-Autos, die jeweils aus vielen übereinandergestapelten Zellen bestehen, werden heute mit einem besonders unfallsicheren Rahmen im Boden des Fahrzeugs untergebracht.

den Elektrolyten wandern. Der Minuspol, also die negative Elektrode, vereinfacht Anode genannt, besteht in heutigen Lithium-Ionen-Batterien aus Grafit als Aktiv- oder Speichermaterial und einer Kupferfolie als Stromsammeler. Grafit nimmt beim Laden Lithiumionen auf, die mit Elektronen aus dem äußeren Stromkreis in elementares Lithium umgewandelt und so gespeichert werden. Beim Entladen geben die Lithiumatome jeweils ein Elektron an den äußeren Stromkreis ab und strömen durch den Elektrolyten zum Pluspol, der positiven Elektrode oder vereinfacht Kathode, die aus Aktivmaterial sowie Aluminiumfolie als Stromsammeler besteht.



60 Die Lithium-Ionen-Batterien, die heute bereits im großen Stil eingesetzt werden, unterscheiden sich untereinander im Aktivmaterial am Pluspol. Den Goldstandard setzt hier ein Oxid aus Lithium, Nickel, Mangan und Kobalt (NMC) als Aktivmaterial am Pluspol, denn NMC-Kathoden verhelfen Batterien zu besonders hoher Energie- und Leistungsdichte. NMC-Batterien haben aber ein Ressourcenproblem: Vor allem Kobalterze sind vergleichsweise selten und teuer, zudem ist ihre Lieferkette fragil, weil sie heute zu fast 75 Prozent in der Demokratischen Republik Kongo gewonnen werden, und das oft unter menschenverachtenden und umweltschädlichen Bedingungen. Daher haben Batteriehersteller den Kobaltanteil in den vergangenen Jahre peu à peu reduziert. Sie setzen aber zunehmend auch auf Lithiumeisenphosphat (LFP) statt NMC als Speichermaterial am Pluspol. LFP-Batterien erreichen zwar nicht so hohe Energiedichten wie NMC-Batterien, die führenden Hersteller haben diesen Nachteil aber durch einen veränderten Aufbau der Zellen wettgemacht, der es ihnen erlaubt, mehr Aktivmaterial in die Batteriezellen zu packen. LFP-Batterien dominieren bereits den weltweiten Markt, selbst europäische Automobilhersteller setzen

sie inzwischen ein, eher bei Klein- und Kompaktwagen. Auch wenn NMC- und LFP-Batterien bereits im großen Stil verbaut werden, sind sie auch in der Grundlagenforschung noch ein Thema. „Beim Entladen finden an den Pluspolen chemische Prozesse statt, die wir noch nicht vollkommen verstehen“, sagt Raphaële Clément. Clément möchte sie systematisch untersuchen, um aus Lithium-Ionen-Batterien noch mehr rauszuholen.

Lithium gibt eines seiner Elektronen nur zu gerne ab, und es besitzt unter den Metallen die geringste Atommasse. Die Masse, die in einer Batteriezelle pro Ladung bewegt und gespeichert werden muss, ist also deutlich kleiner als beim gut dreimal so schweren Natrium. Daher ist Lithium heute für Batterien das Metall der Wahl. Das könnte sich aber ändern, denn es wird im großen Stil nur in Australien, das alleine rund die Hälfte des weltweit verwendeten Lithiums liefert, in Chile und in China gewonnen. Bolivien und Argentinien verfügen zwar über immense Vorkommen, die wirtschaftlich ausgebeutet werden könnten, und selbst in

Deutschland gibt es nennenswerte Reserven. Die Lithiumproduktion ist aber immer kompliziert, energieaufwendig und umweltschädlich. Daher dürfte ein anderer Batterietyp in Zukunft immer wichtiger werden:

Natrium-Ionen-Batterien

„In der wissenschaftlichen Literatur herrschte lange das Missverständnis vor, Natrium sei per se nicht so gut für Batterien geeignet wie Lithium“, sagt Joachim Maier. „Dafür gibt es letztlich keinen wirklichen Grund, deshalb könnte sich Natrium in der nächsten Generation von Batterien durchaus durchsetzen.“ Hier sind noch ganz unterschiedliche Typen im Rennen. In einer Natrium-Ionen-Batterie transportieren, analog zur Lithium-Ionen-Batterie, Natriumionen die Ladung zwischen den beiden Polen hin und her. Dabei sind erste Natrium-Ionen-Batterien schon zur Marktreife gelangt, und 2026 markiert dafür ein wichtiges Jahr:



FOTO: ADOBE STOCK

CATL, einer der führenden chinesischen Batteriehersteller, verkündete 2026 nicht nur, dass er einen Großauftrag über Natrium-Ionen-Batterien als Netzspeicher erhalten hat. Auch das erste Serienfahrzeug mit einer Natrium-Ionen-Batterie soll in diesem Jahr vom Band laufen.

Natrium-Ionen-Batterien schaffen zwar pro Kilogramm nicht die Energiedichte der leistungsfähigsten Lithium-Pendants. CATL hat aber angekündigt, bald zumindest die Energiedichte von Lithium-LFP-Batterien zu erreichen. Der Vorteil von Natrium liegt darin, dass es sich auf der Erde viel häufiger findet als Lithium und

Welche Elektrodenmaterialien sich in Natrium-Ionen-Batterien durchsetzen werden, ist noch offen. CATL verwendet am Pluspol laut einem Bericht des Fachmagazins *Nature* aktuell eine ungiftige Verbindung namens Preußisch Weiß, die aus Natrium und Eisencyanid besteht. Aber auch mit Eisenphosphat und Metalloxiden, die Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid ähneln, aber möglichst keine kritischen Metalle wie Kobalt enthalten, wird experimentiert. Raphaële Clément untersucht zudem Fluoride als Kathodenmaterial.

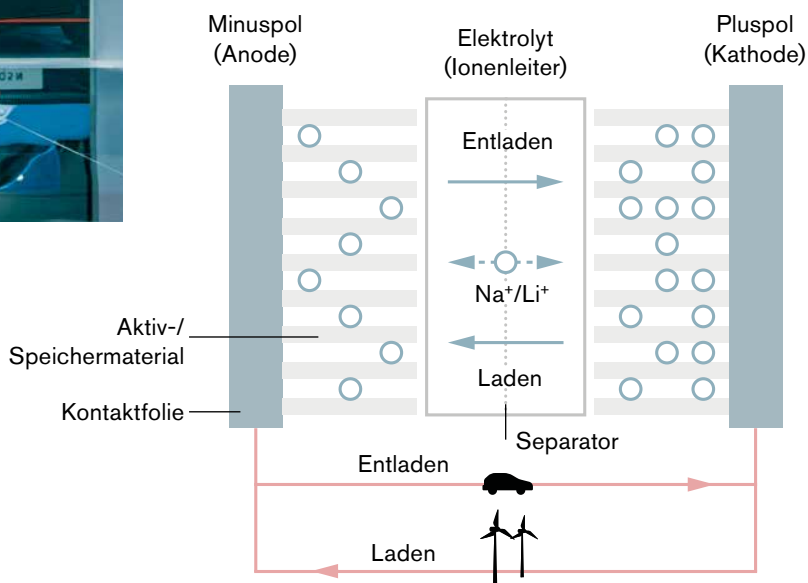
Auf den Punkt gebracht

Für die Elektromobilität sowie für stationäre Speicher im Stromnetz und in Privathaushalten werden verschiedene Batterietypen entwickelt.

Lithium-Ionen-Batterien mit unterschiedlicher Zellchemie dominieren heute den Markt, Natrium-Ionen-Batterien dürften aber immer wichtiger werden, weil sie nachhaltiger und kostengünstiger sein könnten.

Natrium-Metall- und Feststoffbatterien, aber auch ganz neue Konzepte wie anionische Batterien werden derzeit erforscht.

61



GRAFIK: GCO

Blaupause einer Batterie: Beim Entladen geben im Aktivmaterial gespeicherte Lithium- oder Natriumatome am Minuspol, auch Anode genannt, jeweils ein Elektron an den Stromabnehmer ab und wandern als Ionen zum Pluspol, der Kathode. Dort werden sie zusammen mit Elektronen aus dem äußeren Stromkreis etwa in Metalloxiden untergebracht. Beim Laden wird der Vorgang umgekehrt.

viel einfacher zu gewinnen ist. Eine Tonne batterieaugliches Natriumkarbonat kostet daher nur rund 200 Euro, während für eine Tonne Lithiumkarbonat das Hundertfache aufgerufen wird. Natrium-Ionen-Batterien könnten in der Massenproduktion also wesentlich billiger sein. So könnten sie Lithium-Ionen-Batterien vor allem als stationäre Stromspeicher ausstechen. Sie könnten aber auch Elektroautos, die nur eine Reichweite von wenigen 100 Kilometern brauchen, viel kostengünstiger machen.

Bei Natrium-Ionen-Batterien ist auch noch nicht endgültig entschieden, welches Speichermaterial am Minuspol das Rennen machen wird. Grafit, der an der Anode von Lithium-Ionen-Batterien die Lithiumatome speichert, kommt für das größere Natrium nicht infrage. In aktuellen Entwicklungen wird stattdessen ein weniger geordnetes hartes poröses Kohlenstoffmaterial verwendet. „Die Herstellung dieser Materialien vor allem in großen Mengen ist aber keine triviale Sache“, sagt Joachim Maier. Er hat daher mit seinen Mitarbeitern ein Anodenmaterial entwickelt, das mit einem anderen Speichermechanismus als den herkömmlichen Kohlenstoffanoden arbeitet. Das Material von Maiers Team speichert die Ionen und die beim Laden zur Verfügung gestellten Elektronen separat. „Wir nennen das Job-sharing“, sagt Maier. „Das funktioniert ähnlich wie bei einem Kondensator.“ Und wie ein Kondensator kann das Material





FOTO: PICTURE ALLIANCE/DPA | KLAUS-DIETMAR GABBERT

Reserve für die Dunkelflaute: Großbatterien können überschüssigen Strom aus Windkraft und Sonne speichern und wieder abgeben, wenn weder der Wind weht noch die Sonne scheint. Diese Netzspeicher-Anlage in Förderstedt in Sachsen-Anhalt soll 716 Megawattstunden speichern – das entspricht dem durchschnittlichen Stromverbrauch von rund 75000 Zwei-Personen-Haushalten pro Tag – und 2027 ans Netz gehen.

62

sehr schnell ge- und entladen werden, erreicht also hohe Leistungsdichten. Die Forschenden melden derzeit ein Patent auf ihre Entwicklung an.

Natrium-Metall-Batterien

Um die Energiedichte von Natriumbatterien zu erhöhen, verfolgen Forschende auch Konzepte mit metallischem Natrium als Minuspol. Das könnte zum Beispiel mit Schwefel als Pluspol funktionieren. Natrium-Schwefel-Batterien wurden bereits vor rund 50 Jahren entwickelt und erreichen hohe Energiedichten pro Kilogramm. Trotzdem führen sie allenfalls ein Nischendasein. Das liegt auch daran, dass sie bislang nur bei Temperaturen von ein paar Hundert Grad funktionieren, bei denen Natrium und Schwefel flüssig vorliegen. Außerdem finden darin chemische Prozesse statt, die ihre Lebensdauer so sehr begrenzen, dass sie etwa als Netzspeicher unbrauchbar sind. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und

Grenzflächenforschung in Potsdam hat jedoch ein Material aus Schwefel und Kohlenstoff erzeugt, das sich bei Raumtemperatur laden und entladen lässt und in dem die zerstörerischen Aktivitäten unterbunden werden. Die Forschenden entwickeln das Material nun mit dem australisch-britischen Batteriehersteller Gelion weiter. Joachim Maier, der selbst an Schwefelmaterialien für Lithium-Schwefel-Batterien geforscht hat, weist darauf hin, dass die elektrochemischen Eigenschaften der schwefelhaltigen Materialien noch optimiert werden müssen.

Metallisches Natrium ermöglicht zwar Batterien mit beachtlichen Energiedichten, für die Produktion ist es aber ein Graus. Es reagiert mit kleinsten Spuren Feuchtigkeit und Sauerstoff und geht dabei leicht in Flammen auf. Wie bekommt man Natriummetall bei der Produktion also unbeschadet in eine Batterie? Eine Lösung lautet: gar nicht. Sogenannte anodenfreie Natrium-Metall-Batterien enthalten anfangs gar kein Natriummetall. Stattdessen wird am Pluspol ein Material mit beweglichen Natriumionen verbaut.

Diese sollen beim ersten Ladeprozess zum Minuspol, heute meist eine Aluminiumfolie, strömen und sich dort als metallisches Natrium abscheiden. Das klingt elegant, in der Praxis ordnet sich das Natrium aber meist nicht ordentlich auf der Folie an. Stattdessen wächst es oft in Form metallischer Bäume, sogenannter Dendrite, zum Pluspol, und es kommt zum Kurzschluss. Außerdem sind am Pluspol Materialien gefragt, die reichlich Natriumionen enthalten, aber stabil bleiben, wenn diese abwandern. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Mikrostrukturphysik in Halle und des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme in Freiburg versucht daher, das Natrium mit einer Polymermembran auf der Kontaktfolie zu einer geordneten Ansiedlung zu bringen, zudem sucht es nach nachhaltigen natriumreichen und chemisch geeigneten Materialien für den Pluspol.

Feststoffbatterien

Gerade in Natrium-Metall-Batterien macht aber auch eine weitere Komponente Schwierigkeiten: der Elektrolyt. Dieser besteht heute aus einem organischen Lösungsmittel und leitfähigen Salzen. „In der Regel reagiert der Elektrolyt chemisch mit dem Elektrodenmaterial“, sagt Joachim Maier. „Dabei kommt es darauf an, dass die Reaktionsprodukte eine passivierende Schicht auf der Elektrode bilden, damit eine weitere Reaktion unterbunden wird.“ Gerade beim Natrium bilden sich meist aber keine glatten Passivierungsschichten. Außerdem sind die organischen Lösungsmittel der wesentliche Grund dafür, dass bei Batterien und E-Autos immer wieder über die Brennbarkeit gesprochen wird. Statistiken etwa aus den USA zeigen, dass entgegen landläufiger Meinung E-Autos deutlich seltener brennen als Verbrenner. Feuerwehren müssen allerdings geschult werden, die Brände zu löschen. Sowohl die Reaktionsfreudigkeit des Elektrolyten als auch die Brennbarkeit ließen sich zudem mit geeigneten festen Elektrolyten in den Griff bekommen. In Kombination mit metallischen Anoden erreichen sie auch sehr hohe Energiedichten. Daher entwickeln vor allem Automobilhersteller und ihre Partner entsprechende Feststoffbatterien für E-Autos und -Lkw, und zwar nicht nur in der Natrium-, sondern auch in der Lithiumvariante.

Feststoffbatterien haben aber auch ihre Baustellen. Zunächst muss der Elektrolyt Ionen gut leiten. Für Natriumionen gab es schon seit Längerem entsprechende Keramiken, für Lithium sind solche Materialien erst seit jüngster Zeit bekannt. Zudem lässt sich ein fester Elektrolyt nur schwierig in engen Kontakt mit den Elektroden bringen, damit der Ladungstransport über die Grenzfläche funktioniert. Damit wird sich künftig auch Raphaële Clément beschäftigen. Sie wird auch untersuchen, wie sich das vielleicht größte Problem der Feststoffbatterien in den Griff bekommen lässt: „Das Volumen der Elektroden verändert sich beim Laden und Entladen leicht“, sagt die Max-Planck-Direktorin. „Zwischen den Elektroden und dem Elektrolyten entstehen dann Lücken, die weder Elektroden noch Ionen überbrücken können.“ Derzeit werden Feststoffbatterien deshalb oft in Gehäusen mit einem Druck von 500 bis 700 bar zusammengepresst, oder in die Batteriezellen wird doch ein bisschen flüssiger Elektrolyt geschummelt, um den Kontakt sicherzustellen. Raphaële Clément untersucht daher Kompositmaterialien aus einem gummiartigen Kunststoff, der sich an die Volumenänderungen der Elektroden anpasst und in den ein leitfähiges Keramikpulver eingebettet wird.

Alternative Batteriedesigns

Das Start-up Batene variiert nicht die Batteriematerialien, um Batterien leistungsfähiger und kostengünstiger zu machen (siehe *MaxPlanckForschung* 1/2025). Die Ausgründung aus dem Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg setzt vielmehr beim Aufbau von Batterien an, genauer gesagt bei den Metallfolien, die in den Elektroden als Stromsammel dienen. Heute bringen die Hersteller die Aktivmaterialien, die die Ladung speichern, in einem schwierigen und teuren Verfahren in mikrometerdünnen Schichten auf den Kontaktfolien auf. Die Elektroden stapeln sie in hauchdünnen Zellen übereinander. Das ist nötig, weil die besten Speichermaterialien der Elektroden sehr schlecht Strom leiten. Das Team von Batene ersetzt die Folien durch filigrane Metallvliese. So können die Forschenden in einem viel einfacheren

Prozess rund zehnmal dickere Zellen produzieren und sparen Materialien ein, die nicht zur Speicherung beitragen. Unterm Strich könnte die Energiedichte ganz unterschiedlicher Batterietypen deutlich steigen, und die Herstellungskosten könnten um bis zu 50 Prozent sinken.

In allen Batteriezellen, die derzeit in oder kurz vor der Anwendung stehen, wandern beim Laden und Entladen positiv geladene Metallionen zwischen Plus- und Minuspol hin und her. Es geht aber auch

chemischen Wandlungen in beide Richtungen möglich sind, hat Maiers Gruppe mit Nanoplättchen aus Molybdändisulfid in Kohlenstoffnanoröhrchen gezeigt. Solche Ideen aus der Grundlagenforschung scheinen im Rennen um die leistungsfähigen Batterietechniken noch ziemlich weit abgeschlagen. Und welche davon überhaupt die Anwendung erreichen, ist unklar. „Letztlich beruhen die großen Sprünge in der Batterieentwicklung jedoch auf Erkenntnissen der Grundlagenforschung“, sagt Joachim Maier.

←



FOTO: ZHANG YIXI / GETTY IMAGES / VISUAL CHINA GROUP

Akkus der nächsten Generation: Im chinesischen Luoyang werden Natrium-Ionen-Batterien aus Rundzellen produziert. Diese Zellform wird als Alternative zu sogenannten prismatischen Zellen verwendet, die die Form flacher Kästen besitzen und heute in den meisten E-Autos genutzt werden.

anders. Anionen, zum Beispiel Fluoride, könnten die Ladung ebenfalls transportieren. Den Pluspol würden dann Metallfluoride bilden und nicht Metalloxide wie in einigen heutigen Batterien. „Solche Batterien ermöglichen theoretisch höhere Energiedichten“, sagt Raphaële Clément. Ebenfalls mit der Aussicht auf hohe Energiedichten hat Joachim Maiers Gruppe einen völlig anderen Speichermechanismus für den Minuspol untersucht. Als Minuspol von Lithium- und Natrium-Ionen-Batterien wird heute Graphit beziehungsweise poröser Kohlenstoff verwendet, die Metallionen gewissermaßen in gelöster Form aufnehmen. Viel mehr Metall kann ein Material speichern, wenn es damit chemisch reagiert. Dass solche

Glossar

AKKU UND BATTERIE
werden heute synonym gebraucht, die Unterscheidung, dass Erstere wiederaufladbar sind, Letztere nicht, wird kaum noch getroffen.

ANODE
heißt in der Batterieforschung immer der Minuspol, obwohl dieser streng genommen nur beim Entladen eines Akkus die Anode darstellt.

KATHODE
wird der Pluspol genannt, obwohl auch diese Bezeichnung eigentlich nur bei der Entladung zutrifft.



Szene aus
dem Film *Arbeiter
verlassen die
Lumière-Werke* von
1895. Auch diese
scheinbar dokumen-
tarischen Aufnahmen
sind durch Kamera-
position, Zeitpunkt
und Bildausschnitt
inszeniert.



FOTO: GEMEINFREI

Film-Arbeit

65

Filme erzählen nicht nur Geschichten, sie spiegeln auch gesellschaftliche Vorstellungen von Wirklichkeit. Wie Frauen bei der Arbeit auf der Leinwand inszeniert werden, erforscht Tanja Michalsky mit ihrem Team an der Bibliotheca Hertziana – Max-Planck-Institut für Kunstgeschichte in Rom. Wie sich gesellschaftliche Vorstellungen und Machtverhältnisse dabei selbst in kleinsten Details zeigen? Ein Blick hinter die Kulissen.

Text: Sabine Fischer

„Ich wünschte, ich könnte dich berühren.“

Ein Mann liegt rücklings auf seinem Bett, Kopfhörer in den Ohren, und spricht mit leise zitternder Stimme. Er lächelt, sein Gesicht ist gerötet. Verträumt schaut er an die Decke seines Apartments – und gleichzeitig in eine ganz andere Realität. Durch die Telefonleitung antwortet eine körperlose Stimme, verführerisch und voller Emotionen, die sie in Wahrheit gar nicht haben kann. Denn die rauchige Stimme, der die Hauptfigur Theodore im Science-Fiction-Drama *Her* sein Herz ausschüt-

tet, gehört einer künstlichen Intelligenz. Sie ist ein Produkt, eine körper- und seelenlose Gefährtin, die den einsamen Mann als virtuelle Sexarbeiterin begleitet. So nah und intim die Bilder in dieser Szene auch sind – so abwesend bleibt die Frau.

Der Film *Her* zeichnet eine Welt, die aus Einsamkeit und dem Wunsch nach sozialen Beziehungen Profit schlägt. Statt im echten Leben auf eine potenzielle Partnerin zuzugehen, bezahlt Theodore die virtuelle Freundin lieber per Kreditkarte und verliert sich in einer Scheinrealität. Besonders auffällig: Die arbeitende Frau wird in dieser Dystopie buchstäblich ins Off gedrängt.

„Die oben beschriebene Szene zeigt eindrucksvoll, wie Filme soziale Realitäten inszenieren. Allein die Stimme der weiblichen Figur reicht hier aus, um beim Publikum die Vorstellung einer Sexarbeiterin zu wecken. In Wahrheit wird



der Frau aber nicht mal mehr ein physischer Raum zugeschrieben“, sagt Tanja Michalsky, Direktorin an der Bibliotheca Hertziana – Max-Planck-Institut für Kunstgeschichte in Rom. Gemeinsam mit einem Forschungsteam beschäftigt sie sich mit der Frage, wie sich soziale und gesellschaftliche Wirklichkeit auf der Kinoleinwand wiederfindet. Einer der Forschungsschwerpunkte ihres Teams geht den Fragen nach: Wo sind im Film eigentlich arbeitende Frauen zu sehen? Und wie prägt diese Darstellung unser Verständnis davon, wie ihr Platz in der Gesellschaft aussieht?

Besonders interessant sei es, sich einerseits die politischen Dimensionen, die ein Film aufgreife, und andererseits seine ästhetischen Mittel anzuschauen, erklärt Michalsky den Ansatz. „Film schafft Räume, in denen zum Beispiel Macht- oder Klassenverhältnisse dargestellt werden. Aber er ist gleichzeitig auch immer eine ästhetische Erfahrung. Wir fragen uns, wie genau diese Realität gestaltet wird.“ Dafür analysieren die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gleich mehrere Dimensionen – von ästhetischen Elementen wie dem Einsatz von Sound, Kameraeinstellungen, Montage und Licht bis hin zum spezifischen historischen Kontext einer jeden Filmproduktion. „Wir lesen Filme ähnlich wie Texte, analysieren einzelne Sequenzen und schauen, wie der Raum gestaltet ist“, so Michalsky.

Als Filmräume bezeichnet man fiktionale Realitäten, die durch Elemente wie Montage, Storytelling oder Bildkomposition auf der Leinwand lebendig werden. Bei der Analyse gehe es also nicht nur darum, welchen Raum das Publikum vor der Kamera sehe, erklärt Michalsky weiter. „Es ist wichtig, wie dieser Raum manipuliert wird, zum Beispiel durch eine bestimmte Technik, Szenen aneinanderzureihen. Es ist unmöglich, einen Filmraum zu schaffen, ohne gleichzeitig eine soziale Realität darzustellen.“ Familien zum Beispiel würden im Kino häufig gemeinsam am Esstisch gezeigt, um eine intime, vertraute Umgebung zu schaffen, so die Wissenschaftlerin, dagegen würden enge Treppenhäuser von den Zuschauenden zum Beispiel viel eher als Orte der Arbeiterklasse dekodiert werden als eine weitläufige Villa. Auch die Nähe der Figuren zur Kamera, ihre Art zu sprechen oder die Wahl des Filmsets verrate viel über die

soziale Realität der Geschichte. Ein eindrückliches Beispiel: der Kurzfilm *Arbeiter verlassen die Lumière-Werke* (Originaltitel: *La sortie de l'usine Lumière à Lyon*) aus dem Jahr 1895. In einer einzigen Sequenz werden hier Fabrikarbeiterinnen der Lumière-Werke gezeigt, wie sie zur Mittagspause das Gelände verlassen. „Selbst dieser scheinbar dokumentarische Raum ist inszeniert“, ordnet Michalsky ein. „Jemand positioniert die Kamera an

„Frauen werden oft in Arbeitswelten gezeigt, die als typisch weiblich gelten.“

Tanja Michalsky

einem bestimmten Punkt, jemand wählt den Moment aus, ab dem aufgenommen wird, jemand entscheidet später, welche Elemente der Aufnahme gezeigt werden.“ Malvina Giordana, die gemeinsam mit Tanja Michalsky an der Bibliotheca Hertziana forscht, fügt dem hinzu: „Schon an diesem kurzen Film kann man die Bedeutung der arbeitenden Frauen für die Geschichte des Kinos erkennen, denn er interpretiert ihre Wirklichkeit und übersetzt diese für sein Publikum.“

Mit ihrer Interpretation von Realität beeinflussen Filme fast zwangsläufig unser Bild von Normalität, Karriere oder davon, wie ein wünschenswertes Leben aussehen soll: Wer hat sich nicht heimlich schon einmal nach dem großen Hollywood-Showdown gesehnt, bei dem sich Konflikte plötzlich in Luft auflösen und der Traumjob im glänzenden Bürogebäude endlich in Reichweite erscheint? Doch ganz so einfach ist es natürlich nicht. Denn neben der rosaroten Wunschversion von Wirklichkeit legen Filme auch immer wieder eindrucksvoll den Finger in die Wunden einer oft ungerechten Gesellschaft.

Auffällig sei zum Beispiel, dass im Kino bis heute immer wieder Stereotype auftauchen, die auch in der realen Gesellschaft vorherrschen: „Frauen werden oft in Berufen und Arbeitswelten gezeigt, die als typisch weiblich gelten: die Sekretärin, die Lehrerin, die fiese Karrierefrau – oder sie haben erst gar keinen Beruf und werden über eine männliche Hauptfigur charakterisiert“, so Michalsky. Der „Male Gaze“, also der männliche Blick auf die Figuren, spiele hierbei noch immer eine große Rolle. „Auch im Kino müssen arbeitende Frauen oft schön sein. Man findet häufig Einstellungen, die sie etwa in einem besonders ansprechenden Seitenprofil zeigen oder in denen weibliche Figuren so posieren, dass ihr Körper besonders für Männer attraktiv wirkt.“

Interessant sei, dass viele Diven der 1950er-Jahre im italienischen Kino die Rolle der Prostituierten gespielt haben, so Giordana. „Denken wir nur an Lea Padovani in *Es geschah Punkt 11* [Originaltitel: *Roma ore 11*, 1952], Linda Darnell in *Angels of Darkness* [Originaltitel: *Donne proibite*, 1954] oder Simone Signoret in *Adua und ihre Gefährtinnen* [Originaltitel: *Adua e le compagne*, 1960].“ In letzterem Film wird das Drama von vier Prostituierten erzählt, die infolge eines 1958 erlassenen Gesetzes, durch das Bordelle in Italien verboten wurden, gezwungen waren, sich in der italienischen Gesellschaft mit einer anderen Arbeit neu zu erfinden. Der Film begleitet diese Gruppe ehemaliger Prostituiertener dabei, wie sie gemeinsam ein Restaurant eröffnen – ein Ringen um Selbstbestimmung und Kontrolle in einer Gesellschaft, die sie gebrandmarkt hat. „Man sieht, wie die Frauen versuchen, sich einen neuen Raum zu erkämpfen, aber im Grunde ist es wieder nur ein Ort, der ihnen nicht gehört. Die Bordelle waren unsichtbare Orte männlicher Dominanz, und die Protagonistinnen scheitern daran, einen neuen Platz in der Gesellschaft zu finden“, so Giordana. Daher sagt der Film in der Art und Weise, wie er diese Berufskategorie darstellt, viel über die italienische Gesellschaft jener Zeit aus.

Später dann, in den 2000er-Jahren, interpretiert das italienische Kino die weltweite Wirtschaftskrise und die damit zunehmend prekären Beschäftigungsverhältnisse, oft durch mehr oder weniger anspruchsvolle Komödien. Gerade die weiblichen Figuren zeigen, wie Ge-

schlecht und Machtverhältnisse im Arbeitskontext miteinander verflochten sind. Oft sind die Protagonistinnen hoch qualifiziert und finden keine angemessene Stelle. Der Film *Das ganze Leben liegt vor dir* (Originaltitel: *Tutta la vita davanti*) aus dem Jahr 2008 zeigt beispielsweise eine Philosophieabsolventin, die in einem Callcenter arbeitet und unter prekären Bedingungen in einer Wohnsiedlung lebt. In der Komödie *Do You See Me?* (Originaltitel: *Scusate se esisto!*) aus dem Jahr 2014 muss sich eine gut ausgebildete Architektin als Mann ausgeben, um in der Branche Fuß fassen zu können. Überqualifizierung und strukturelle Diskriminierung aufgrund des Geschlechts werden so zu zentralen Themen dieses Jahrzehnts. „Kino hat die Kraft, das sichtbar zu machen, was die Gesellschaft lieber unsichtbar machen möchte“, sagt Malvina Giordana.

Die Arbeitsrealität von Frauen ist also weit komplexer als die Darstellung weiblicher Figuren in Büros, Redaktionen oder an

„Kino macht sichtbar, was die Gesellschaft gerne unsichtbar machen möchte.“

Malvina Giordana

Supermarktkassen. „Ich beschäftige mich deshalb nicht nur mit Filmen, die Frauen in klassischen Arbeitsumgebungen zeigen“, so Giordana. „Ich frage mich, wie Filme einen sozialen Raum schaffen, in dem wir als Zuschauende erkennen: Diese Frau arbeitet gerade.“ Für sie zähle dazu zum Beispiel auch eine Stadt, in der weibliche Figuren hin und her hasteten, um zahllose Erledigungen zu machen, sowie der Kosmos des Hauses. Gerade aus feministischer Perspektive ist es interessant, dass Filme in der Lage sind, uns die Mehrarbeit der Frauen jenseits des klassischen

Nine-to-five-Arbeitsalltags zu zeigen. Der französische Film *Julie – Eine Frau gibt nicht auf* (Originaltitel: *À plein temps*, 2021) zum Beispiel zeigt den Alltag einer alleinerziehenden Mutter: „Er beginnt mit einer Szene, in der man einen Frauenkörper sieht, der atmet. Lange, tiefe Atemzüge. Sonst nichts. Als Zuschauer merkt man erst, welche Bedeutung dieser Moment hatte, wenn man realisiert, wie wenig Zeit die Frau in ihrem Alltag eigentlich zum Atmen hat“, so die Forscherin, „wenn es um Frauen in Arbeitskontexten geht, dokumentieren Filme oft nicht nur soziale Missstände, sondern zeigen darüber hinaus auch die tiefe Erschöpfung und den Kampf um Kontrolle über den eigenen Körper.“

Kitty Greens *The Assistant* wirft 2019 einen besonders harschen Blick auf die Arbeitsrealität von Frauen. In einem klaustrophobischen Kammerspiel begleitet der Film seine Protagonistin Jane einen Tag lang bei ihrem Bürojob als Assistentin in einer New Yorker Produktionsfirma. „Das Interessante an diesem Film ist für mich nicht nur der Raum, in dem er spielt“, sagt Giordana. „Ausbeutung, Erschöpfung und Kontrollverlust liegen hier in jedem Schritt und jedem Atemzug der

Figur. Der Film gibt ihr keinen Raum und keine Stimme. Und als sie schließlich versucht, ihre Stimme zu erheben, wird sie sofort ruhiggestellt, indem man ihr mit Kündigung droht.“

Es sei kein Zufall, dass soziale Missstände wie zum Beispiel die ungerechte Behandlung im Job oder eine ungleiche Verteilung von Care-Arbeit aktuell vor allem über weibliche Figuren erzählt würden, finden beide Wissenschaftlerinnen. „Es ist einfacher für Filme, diese bedrückenden Arbeitskontexte über Frauenfiguren zu erzählen, weil sie eine radikalere Perspektive auf die Situation bieten. Frauen wurden historisch immer stärker kontrolliert und marginalisiert“, sagt Giordana. Das sieht auch Michalsky so und ergänzt: „Filme zwingen uns, uns mit Stereotypen auseinanderzusetzen und damit, wie diese überdauern oder sich im Laufe der Zeit verändern können.“

←

67



FOTO: BHMPI/ENRICO FONTOLAN

An der Bibliotheca Hertziana erforschen Max-Planck-Direktorin Tanja Michalsky (rechts) und Malvina Giordana, wie sich soziale und gesellschaftliche Wirklichkeit im Film wiederfindet.

Mechanik des Lebens

Text:
Nora Lessing

68

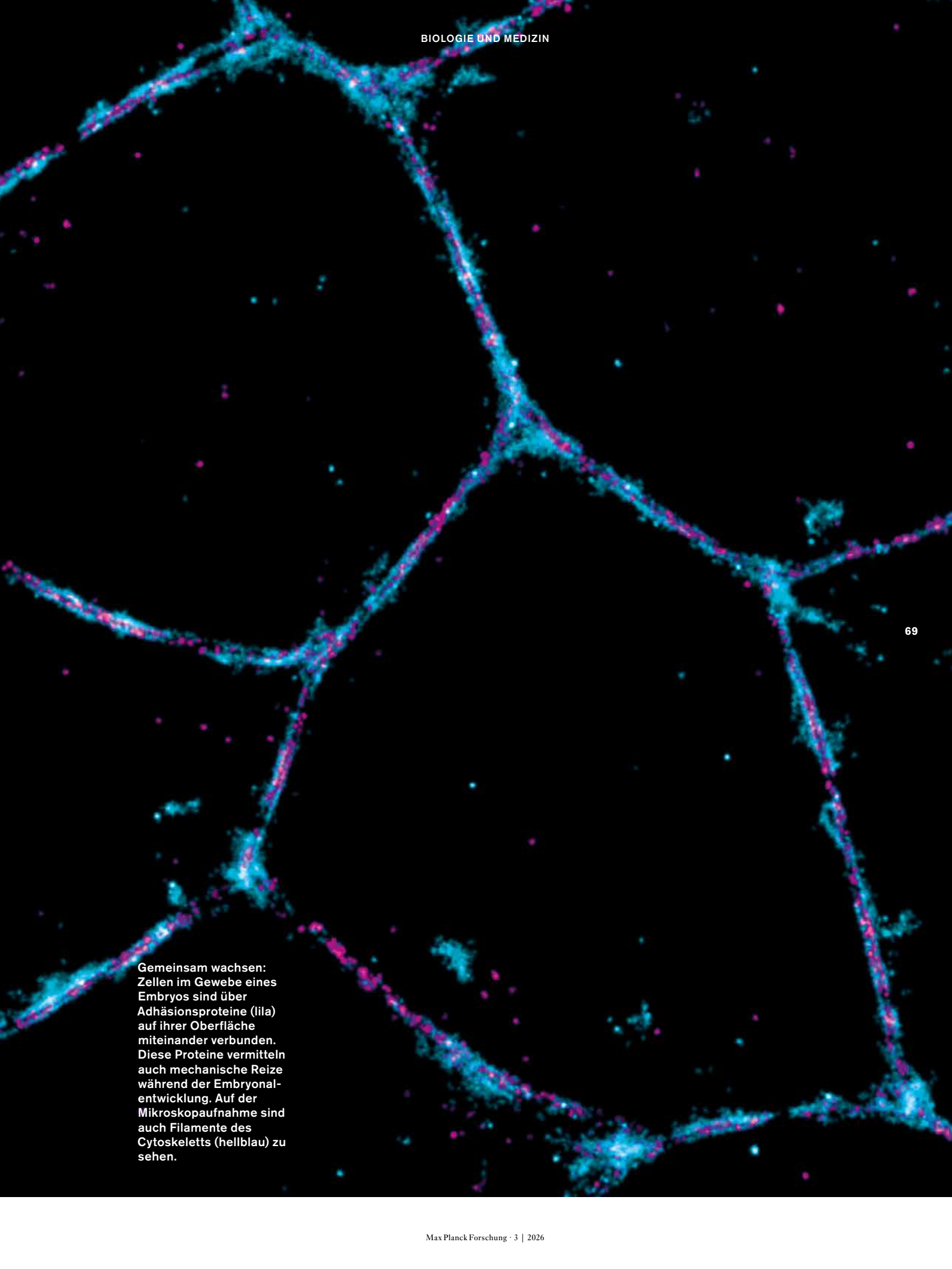
Am Anfang ist das Leben äußerst empfindlich. Schon die Kräfte, die während der Entwicklung eines Embryos wirken, können die präzise Koordination bei der Formgebung gefährden. In einem interdisziplinären Team haben Matthias Häring und Fred Wolf, Wissenschaftler an der Georg-August-Universität Göttingen und am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, untersucht, wie Gewebe in einem Embryo mit mechanischen Kräften umgeht. Eine wichtige Rolle spielen dabei Mechanismen, die in der Biologie vom Hörsinn bekannt sind.

Mensch, Maus, Fliege – das Wunder des Lebens beginnt mit einer einzigen Zelle, die Kopien von sich selbst herstellt. Ist eine kritische Masse an Zellen erreicht, spezialisieren sie sich auf unterschiedliche Aufgaben, um gemeinsam einen individuellen, komplexen Organismus zu bilden. Hierbei spielen Taktgeber wie das Erbgut, die Genregulation und chemische Botenstoffe eine wesentliche Rolle. Doch auch mechanische Reize haben ihre Hände im Spiel, dienen den Zellen unter anderem als Mittel zur Kommunikation. Wie genau Zellen diese Reize verarbeiten, um sich miteinander auszutauschen, haben Matthias Häring und kooperierende Forschende aus Göttingen und Marburg kürzlich in einem interdisziplinären Projekt an Embryonen von Fruchtfliegen untersucht.

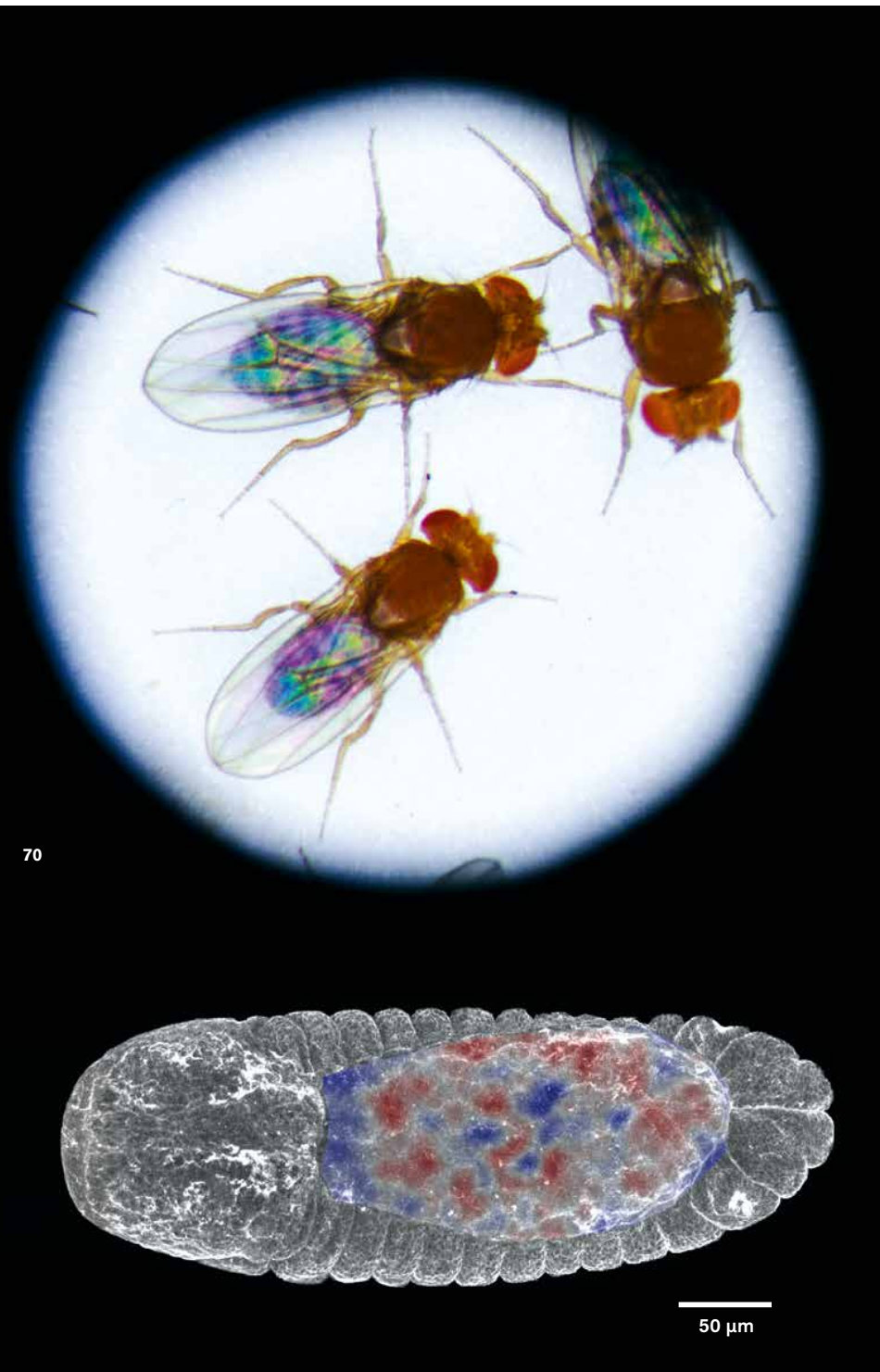
„Dass wir diesen Modellorganismus gewählt haben, hat den Grund, dass Fruchtfliegen zwar hochkomplexe Tiere sind, sich im Vergleich zu vielen anderen Arten aber einfacher untersuchen lassen. Zu-

→

FOTO: BIOPHYSICAL JOURNAL, MAR 03, 2026, VOL. 125, ISSUE 5, P1207-1402



Gemeinsam wachsen:
Zellen im Gewebe eines
Embryos sind über
Adhäsionsproteine (lila)
auf ihrer Oberfläche
miteinander verbunden.
Diese Proteine vermitteln
auch mechanische Reize
während der Embryonal-
entwicklung. Auf der
Mikroskopaufnahme sind
auch Filamente des
Cytoskeletts (hellblau) zu
sehen.



Muster der Entwicklungsbiologie: An der Oberfläche eines Fruchtfliegenembryos pulsiert das Gewebe. In roten Bereichen schwingen die Zellen dabei überwiegend im Gleichtakt, in den blauen Zonen schwingen sie hauptsächlich gegenläufig. Synchronisierte Oszillationen puffern Kräfte ab und könnten zudem das umliegende Gewebe zusammenziehen.

dem ist zu dieser Spezies schon sehr viel bekannt, und wir können daher auf einen großen Wissensschatz zurückgreifen“, erläutert der Physiker, der sowohl an der Georg-August-Universität Göttingen als auch am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation forscht. Die Erkenntnisse, die Matthias Häring und seine Mitstreitenden bei ihrer Forschung an Fruchtfliegen gewinnen, sind so grundständig, dass sie sich mindestens teilweise auch auf andere Spezies anwenden lassen. So möchten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zu einem tiefgreifenderen Verständnis nicht nur der Embryonalentwicklung, sondern auch der Rolle mechanischer Kräfte in der Biologie und der Evolution des Nervensystems beitragen.

Pulsierende Zellen

Ihren Anfang nahm die Forschung bei theoretischen Vorüberlegungen zu physikalischen Kräften, die im Gewebe mithilfe winziger Strukturen übertragen werden – den sogenannten Adhäsionsmolekülen. Zellen nutzen diese Proteine, um im Gewebe nicht auseinanderzudriften. „Sie halten sich sozusagen über die Adhäsionsmoleküle aneinander fest“, erklärt Matthias Häring. Diese Zellverbindungen kann man sich wie Klettverschlüsse oder auch kleine Haken vorstellen, die in die Zellwände eingelassen sind – relativ steife Strukturen, die benachbarte Zellen miteinander verknüpfen. Schon seit einigen Jahren ist bekannt, dass diese Strukturen mechanische Signale von Zelle zu Zelle übertragen.

Dieses Wissen brachten die Forschenden mit einer experimentellen Beobachtung zusammen, die ihnen zunächst Rätsel aufgab: Auf Videoaufnahmen von Fruchtfliegenembryonen in einem frühen Entwicklungsstadium – angefertigt werden diese mit Hochleistungsmikroskopen – ist zu sehen, dass Teile des Gewebes im Inneren des Embryos oszillieren, also gewissermaßen pulsieren. Den Forschenden stellten sich nun viele Fragen. Vor allem: Wie kommt es zu diesen Oszillationen und welche Funktion könnten sie haben? Um sich einer Antwort auf diese Fragen anzunähern, hilft es, sich die Situation der Zellen im embryonalen Gewebe genauer vor Augen zu führen: Damit aus einem undifferenzierten Zellhaufen eine

FOTOS: FRANK VINKEN (OBEN), MATTHIAS HÄRING, MPI FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION (UNTEN)

Fliege mit Tracheensystem, Beinen und Kopf entstehen kann, müssen die Zellen ihre Gestalt verändern können. Dabei üben sie Kräfte auf benachbarte Zellen aus, sind aber auch den Kräften von ihren Nachbarn ausgesetzt. Im Gewebe wachsen allerdings Zellen dicht an dicht, sind in dem Raum, den sie einnehmen können, also relativ beschränkt. Entsprechend hat schon die morphologische Veränderung einer einzigen Zelle Auswirkungen auf ihre Nachbarn: Dehnt sich die Zelle aus, gibt sie hierbei über die Adhäsionsmoleküle einen mechanischen Druck weiter. Mit anderen Worten: Sie schubst ihre Nachbarn. Je nachdem, wie kräftig dieser Schubs ist, kann die Situation für die Nachbarn durchaus brenzlich werden. „Benachbarte Zellen können im Extremfall durch zu hohen Druck sogar zugrunde gehen – oder sie werden in den Embryo eingestülpt, sodass zum Beispiel Fehlbildungen entstehen können“, erklärt Matthias Häring. Das müssen die Zellen verhindern, wenn ihre Entwicklung erfolgreich verlaufen, aus einem Zellhaufen ein lebendiges Tier werden soll.

Dem Druck einfach aus dem Weg gehen können die Zellen jedoch nicht, schließlich sind sie selbst von Nachbarzellen umzingelt, haben keine Möglichkeit auszuweichen. Wie gehen sie mit dem Druck um? Und wie können sie andererseits Druck ausüben, um umliegendes Gewebe in notwendiger Weise zu verformen? Die Theorie der Forschenden: Möglicherweise helfen die Oszillationen den Zellen zum einen, den Druck und generell mechanische Belastungen zu verteilen. Zum anderen könnten sie durch die Oszillationen aber auch ihre Kräfte bündeln und so den Embryo in Form bringen.

Die Oszillationen entstehen dabei, indem Zellen sich klein machen, wenn sie mechanischem Druck ausgesetzt sind. „Zieht sich eine Zelle zusammen, dann überträgt sie über die Adhäsionsmoleküle Zugkräfte auf ihre Nachbarn“, erklärt Matthias Häring. „Die Nachbarzellen werden in so einem Fall also zunächst gedehnt.“ Damit Zellen auf solche erzwungenen Veränderungen ihrer Form reagieren können, brauchen sie Werkzeuge, die bei der Gestaltwandlung helfen. Ein heißer Kandidat für ein solches Werkzeug sind mechanosensitive Ionenkanäle in der Zellmembran. Sie helfen den Zellen, ihre Größe anzupassen.

Ionenkanäle sind eine Grundstruktur des Lebens. Die kleinen Tunnel stellen eine Verbindung zwischen der Umgebung und dem Zellinneren her. Im Innenohr von Wirbeltieren wie dem Menschen haben mechanosensitive Ionenkanäle dabei eine besonders wichtige Funktion: Sie ermöglichen uns zu hören. Kommt eine Schallwelle im Innenohr an, bringt sie dort feine Sinneshäärchen in Bewegung, die an den Eingangsportalen der Ionenkanäle wachsen. Die Bewegung der Haare weitet die Portale, sodass Ionen in die Zelle einströmen können. So wird aus einem mechanischen ein elektrisches Signal, das bis zum Gehirn weitergeleitet wird. Aus physikalischer Sicht dienen die Ionenkanäle im Innenohr dazu, mechanische in elektrische Signale umzuwandeln. „Unsere Idee war nun, dass dieselben Ionenkanäle und derselbe Grundmechanismus auch bei der Zellkommunikation eine Rolle spielen könnten – also dass die Zellen im Embryo

„Wie hat sich das Nervensystem von Tieren entwickelt?“

Matthias Häring

diese Ionenkanäle nutzen, um auf mechanischen Druck und Zug reagieren zu können“, erklärt Fred Wolf, Professor an der Georg-August-Universität Göttingen und Leiter einer Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation.

Um die Theorie zu überprüfen, nahmen er und seine Mitstreitenden eine ganze Reihe von Experimenten vor. Mithilfe künstlicher Intelligenz werteten sie große Datenmengen aus und blickten so tief in das subtile Zusammenspiel der Zellen. Der Fokus der Forschenden lag dabei auf Ionenkanälen vom Typ Tmc – denselben Ionenkanälen, die im Innenohr das Hören ermöglichen. Im Embryo schleusen die Zellen durch diese kleinen Tunnel Calciumionen in ihr Inneres. Dort nehmen die

Auf den Punkt gebracht

Die Entwicklung eines Embryos wird nicht nur von Einflussfaktoren wie dem genetischen Bauplan und den chemischen Signalstoffen bestimmt, sondern auch von mechanischen Reizen. Im Gewebe entstehen diese Reize durch die kontinuierliche Verformung der Zellen.

Durch koordinierte Oszillation fangen kleine Gruppen von Zellen einerseits äußere Kräfte ab und üben andererseits gemeinsam Kräfte auf ihre Umgebung aus.

Mechanische Signale im Embryonalgewebe öffnen Ionenkanäle in der Zellmembran. Strömt über die Kanäle eine gewisse Menge an Calciumionen ein, zieht sich die Zelle zusammen. Entsprechende Ionenkanäle verleihen Wirbeltieren ihren Hörsinn.

Ionen Einfluss auf die innere Struktur der Zelle, das sogenannte Cytoskelett. Ähnlich wie ein Muskel kann sich das Cytoskelett – eine komplexe Matrix aus Proteinen – infolge eines Calciumsignals zusammenziehen und so dafür sorgen, dass die Zelle insgesamt weniger Raum einnimmt. Soll sich das Cytoskelett anschließend wieder entspannen, soll sich die Zelle also ausdehnen, hilft unter anderem ein zellinternes Pumpsystem dabei, überschüssiges Calcium wieder in die Umgebung abzugeben. „Zunächst haben wir beobachten können, dass sich die Zellen im embryonalen Gewebe tatsächlich immer dann zusammenziehen, wenn kurz zuvor die Calciumkonzentration in ihrem Inneren angestiegen ist“, berichtet Matthias Häring. Ein erster Hinweis darauf, dass die calciumtransportierenden Ionenkanäle bei der Oszillation des embryonalen Gewebes tatsächlich ihre Finger im Spiel haben könnten. Nun entwickelten die Forschenden ein auf Calciumsignalen basierendes Verfahren, mit dessen Hilfe sie einzelne Zellen gezielt zur Kontraktion bringen können, und beobachten, was in der unmittelbaren Umgebung einer kontrahierenden Zelle vor sich geht.

Das verblüffende Ergebnis: In der Regel ist kurze Zeit später auch in den Nachbarzellen ein Calciumsignal messbar – und

71



auch diese ziehen sich zusammen. Benachbarte Zellen synchronisieren somit ihr Verhalten. „Wenn eine Zelle kontrahiert, dann sollten sich unseren theoretischen Vorannahmen gemäß in so einem Gewebe eigentlich die Zellen daneben ausdehnen“, sagt Matthias Häring. „Genau das aber passiert nicht: Stattdessen tun die Zellen es ihrem Nachbarn gleich.“ Der Effekt ist dabei lokal begrenzt: Es sind immer nur einige wenige Zellen, die gemeinsame Sache machen, um einerseits Kräfte von außen abzapfen und andererseits konzentriert Kräfte auf Nachbargewebe auszuüben. Für die Koordination in kleinen Zellverbänden gibt es einen einfachen Grund: Die oszillierenden Gewebeteile sind von relativ starrem Gewebe umgeben, das nicht oszilliert. Deshalb müssen sich manche Zellverbände des oszillierenden Gewebes ausdehnen, während sich andere zusammenziehen. Nur so bleiben sie im starren Rahmen des äußeren Gewebes.

Kanäle früher Kommunikation

72

Dass Synchronisation den Zellen hilft, mechanische Kräfte zu verteilen und abzapfen, bestätigten Experimente mit Zellen, in denen das Team gentechnisch verhinderte, dass Tmc-Ionenkanäle gebildet werden und die Zellen sich mechanisch abstimmen können. Diese Zellen nahmen im Embryogewebe teils eine ungewöhnliche Form an: Sie sind nicht wie üblich rund oder hexagonal, sondern deutlich in die Länge gezogen, und zwar in der Richtung, in der sie der größten Kraft ausgesetzt sind. „Einzelne Zellen schaffen es also offenbar nicht, die im Gewebe wirkenden Kräfte auszugleichen“, erklärt Matthias Häring. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, ob Zellen über die synchronisierte Oszillation auch gemeinsam Kraft auf umliegendes Gewebe ausüben.

In künftigen Studien wollen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auch mehr über die Funktion und die Wirkung von Adhäsionsmolekülen und Ionenkanälen im embryonalen Gewebe herausfinden. Mit den Erkenntnissen, die sie daraus gewinnen, möchten sie auch zu einem besseren Verständnis evolutionsbiologischer Zusammenhänge beitragen. „Eine

ganz grundsätzliche Frage ist: Wie haben sich die Wahrnehmung und das Nervensystem von Tieren im Laufe der Evolution entwickelt?“, so Matthias Häring. „Bislang kannte man mechanosensitive Ionenkanäle vor allem als Strukturen, die für den Hör- und den Tastsinn unerlässlich sind. Unsere Ergebnisse legen nahe, dass diese Kanäle evolutionär bereits Kommunikationsfunktionen erfüllt haben, bevor sich spezialisierte Sinneswahrnehmungen entwickelten.“ Die kleinen Kanäle könnten so etwa eine wichtige Rolle beim Übergang von Einzellern zu mehrzelligen Organismen gespielt haben. „Über die Kanäle können Zellen mechanische Kräfte wahrnehmen und so miteinander kommunizieren – ein ganz grundständiger Mechanismus“, sagt Fred Wolf. „Möglicherweise haben wir mit unseren Experimenten also die ursprüngliche Funktion der Ionenkanäle aufgedeckt. So kommen wir Antworten auf die Frage näher, wie komplexes Leben entstanden ist.“

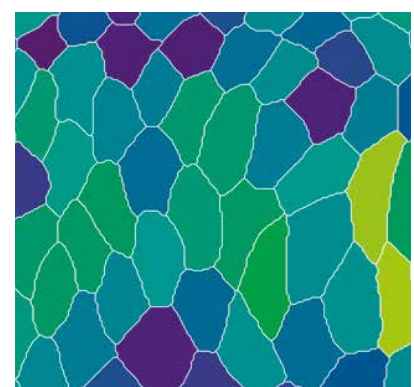
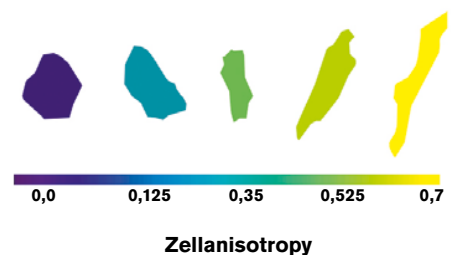
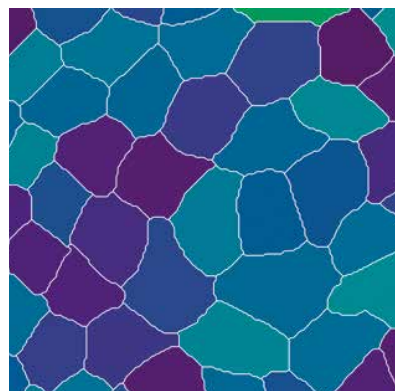


Glossar

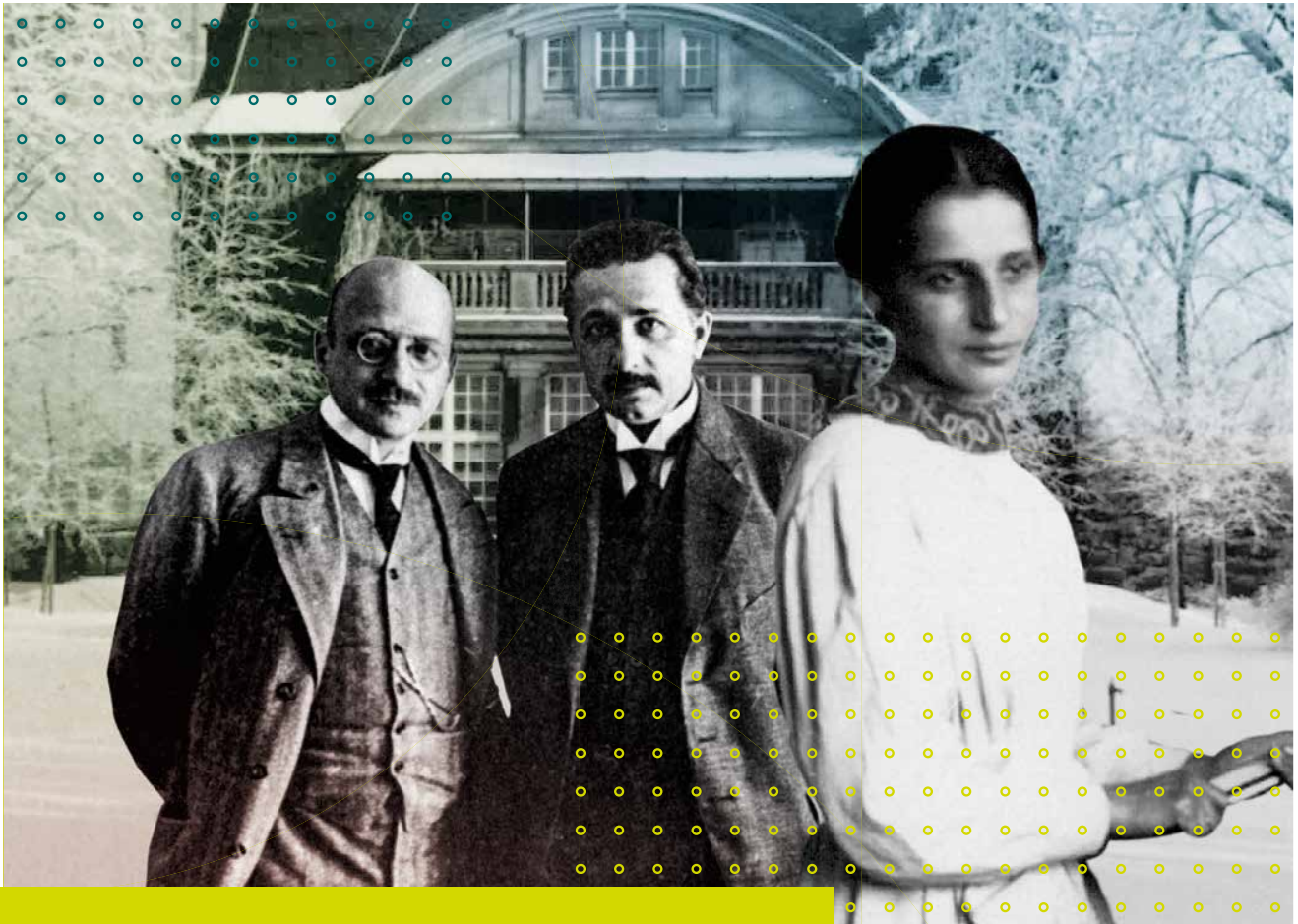
ADHÄSIONSMOLEKÜLE
verbinden in einem Gewebe benachbarte Zellen miteinander. Dadurch können mechanische Kräfte und Belastungen von einer Zelle auf die nächste übertragen werden.

CYTOSKELETT
heißt ein Netzwerk aus Proteinfilamenten, das in der Zelle auf- und abgebaut werden kann. Es verleiht der Zelle ihre Form und ermöglicht ihr, sich zu bewegen und Stoffe in ihrem Inneren dorthin zu transportieren, wo sie gebraucht werden.

Aus der Form geraten:
In Fliegenembryos, denen der Tmc-Ionenkanal fehlt (unten rechts), sind die Zellen im Vergleich zum normalen Embryo (unten links) in die Länge gezogen. Ein Maß dafür ist die Zellanisotropie.



GRAFIK: MATTHIAS HÄRING, MPI FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION



DahlemTour Berlin

Stadtführungen für Gruppen, Schulklassen
und Einzelpersonen.

Max-Planck-Gesellschaft
Büro Berlin – Abteilung Kommunikation

Anfragen:
Dahlemtour@gv.mpg.de



Informationen:
www.mpg.de/dahlemtour

Überblicks- und Thementouren

Tauchen Sie ein in die faszinierende Welt der Wissenschaft im 20. Jahrhundert und begeben Sie sich auf eine Zeitreise durch das „deutsche Oxford“, heute Campus Berlin-Dahlem.

Audioguide

Entdecken Sie den Campus Dahlem auf eigene Faust mit dem Audioguide.



Abendstimmung
am Gambia River:
In der Dämmerung
fliegt eine Gruppe
Witwenpfeifgänse
über das Schilf.

74 Max-Planck-Forschende kooperieren mit Partnern in mehr als 120 Ländern. Hier schreiben sie über ihre persönlichen Erfahrungen und Eindrücke. Giacomo Costalunga, Doktorand am Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz in Seewiesen, reist jedes Jahr nach Westafrika, wo er das Gesangsverhalten von Nachtigallen studiert. Im Rahmen des Bridging-Minds-Förderprogramms hat er dort auch eine Summer School zur experimentellen Bioakustik für afrikanische Studierende mitorganisiert.

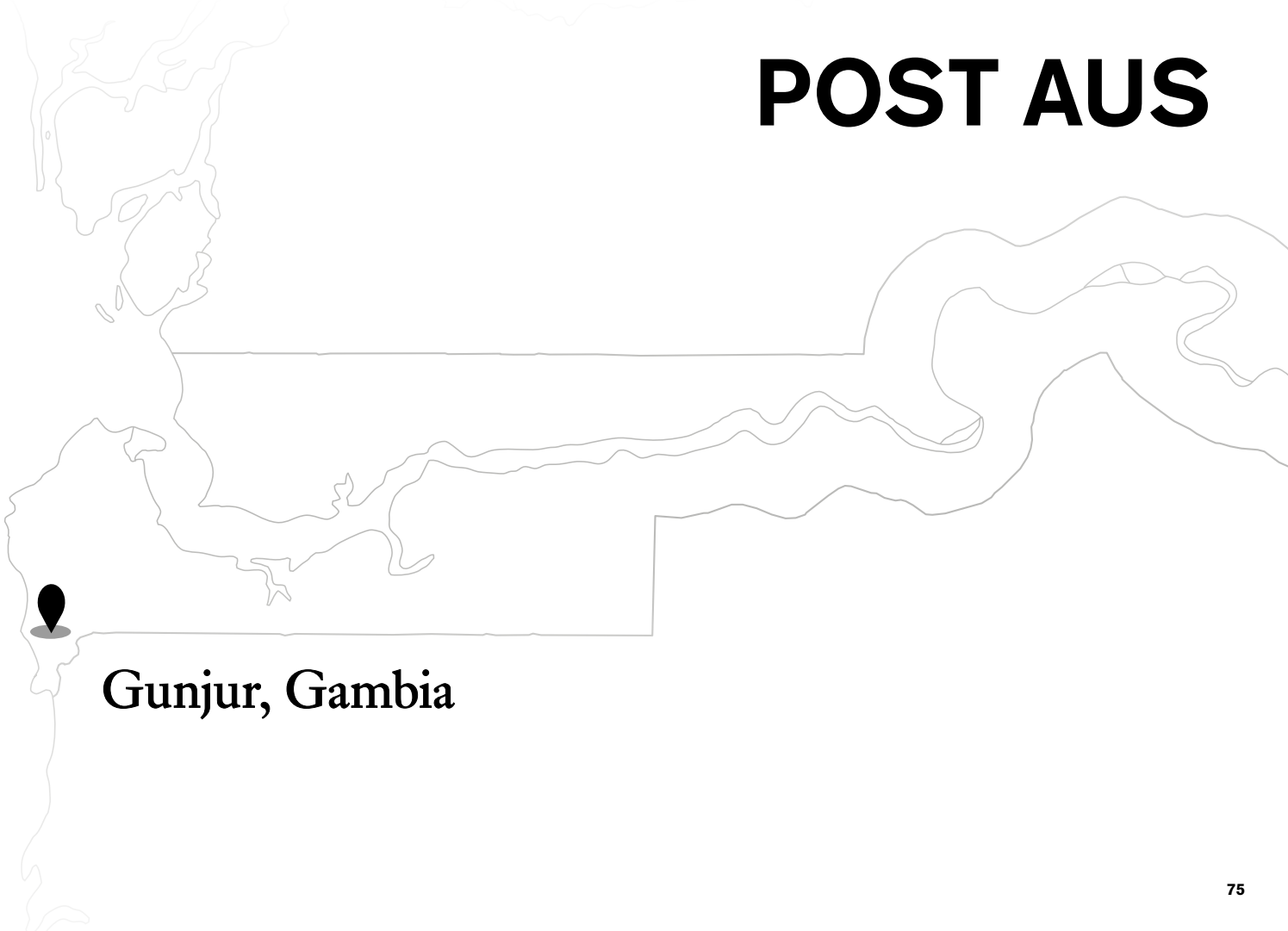
Ein schmaler Streifen Land, der sich entlang des Flusses rund 480 Kilometer vom Atlantik ins Landesinnere zieht: Gambia ist der kleinste Staat auf dem afrikanischen Festland und gerade einmal etwa ein Drittel so groß wie Belgien. Trotz seiner geringen Fläche beherbergt das Land eine erstaunliche

Vielfalt an Lebensräumen – von Stränden über Mangroven und Feuchtgebiete bis hin zu Wäldern und Savannen. Mehr als 600 Vogelarten wurden hier bereits nachgewiesen, darunter etliche, die in Mitteleuropa brüten und die Wintermonate in Westafrika verbringen. Eine davon ist die Nachtigall (*Luscinia megarhynchos*).

Anders als viele andere Vögel singen Nachtigallmännchen nicht nur während der Brutzeit, sondern auch in ihrem Winterquartier, um ihr Revier gegenüber Rivalen zu verteidigen. Dabei liefern sich die Vögel regelrechte Gesangsduelle, bei denen sie Tonhöhe und -länge blitzschnell auf die Signale des Konkurrenten abstimmen. Mich interessiert, wie das Vogelgehirn diese komplexen akustischen Informationen verarbeitet und den Gesang steuert. Dafür nehme ich die Duelle im Freiland auf und analysiere sie später im Labor. Mithilfe einer Klangattrappe schlüpfte ich manchmal sogar selbst in die Rolle eines vermeintlichen Konkurrenten. Im Freiland bin ich regelmäßig mit den Kolleginnen und Kollegen des Kartong Bird Observatory im Süden des

Landes unterwegs – vor allem bei der Beringung von Nachtigallen und anderen Singvögeln.

In Reisekatalogen wird Gambia oft als „die lächelnde Küste Afrikas“ bezeichnet – ein Klischee, das ich immer wieder bestätigt finde: Mehrmals bin ich mit gambischen Freunden durchs Land gereist und habe die Menschen als kontaktfreudig, offen und herzlich erlebt. Diese Offenheit und Freude am Austausch waren ein großer Gewinn für unsere Summer School zur experimentellen Biophysik, die ich gemeinsam mit Mahalakshmi (Meera) Ramadas und Carlos Gómez-Guzmán – zwei weiteren Promovierenden aus unserem Institut – in dem Küstenort Gunjur organisiert habe. Der zweiwöchige Workshop wurde im Rahmen des Bridging-Minds-Programms aus Fördermitteln der Max-Planck-Gesellschaft finanziert. Für mich persönlich war die Summer School ein Herzensprojekt, mit dem ich den Menschen, in deren Heimat ich schon so viel geforscht habe, etwas zurückgeben wollte. Gleichzeitig war sie für uns drei eine hervor-



Gunjur, Gambia

ragende Möglichkeit, unsere eigenen didaktischen Fähigkeiten zu erproben und weiterzuentwickeln. Mit dabei waren sieben gambische Bachelorstudierende und drei Forschungsassistenten aus unterschiedlichen Fachrichtungen, von Biologie über Umweltwissenschaften bis hin zu Physik. Neben Theorie-Sessions zur Tierstimmenforschung und Bioakustik hatten wir viel Zeit im Freiland eingeplant: um Artenvielfalt zu erleben, Vogelstimmen aufzunehmen und die Daten gemeinsam auszuwerten.

Das Leben in Gambia folgt einem eigenen Rhythmus – bestimmt vor allem von der Temperatur. Bevor die Hitze des Tages einsetzt, sind viele Tiere besonders aktiv. Kurz nach Sonnenaufgang schnappten wir uns daher unsere Ferngläser und brachen zu Fuß zu einer kleinen Morgensafari auf. Meist entdeckten wir schon nach wenigen Minuten verschiedene Finken, Bienenfresser und Nashornvögel, die im Morgenlicht auf Nahrungssuche waren. Nach dem Frühstück arbeiteten wir an unseren Projekten. In den nahe gelegenen Naturgebieten nahmen wir Vogelstimmen auf

und durchliefen anschließend gemeinsam die einzelnen Schritte eines Forschungsprojekts – von der Datenerhebung über die Analyse bis hin zur Präsentation der Ergebnisse. Auch dabei lernten wir, uns den Gegebenheiten vor Ort anzupassen: Mindestens einmal am Tag, oft mitten in einer PowerPoint-Präsentation, fiel plötzlich der Strom aus: kein Beamer, kein Licht, keine Klimaanlage. Die gambischen Studierenden nahmen das gelassen. Auch im Uni-Alltag ist eine zuverlässige Stromversorgung für sie längst nicht selbstverständlich. Kurzerhand wechselten wir ans Whiteboard und diskutierten einfach weiter. Am Nachmittag, wenn die Hitze ihren Höhepunkt erreichte, saßen wir im Schatten eines Baums im Garten, sprachen über Wissenschaft oder spielten zwischendurch ein Brettspiel. Gegen Sonnenuntergang ließen wir den Tag in der Natur ausklingen: Wir spazierten am Fluss entlang und beobachteten Pelikane, die vom Meer zu ihren Schlafplätzen zurückkehrten. Im Garten waren noch einmal die Fliegenschnäpper zu hören. Schließlich gehörte die Nacht den Grillen, Fröschen und Fledermäusen.



FOTO: DANIELA VALLENTIN

GIACOMO COSTALUNGA

31, stammt aus Udine in Italien und hat an den Universitäten in Padua und Triest studiert. Derzeit forscht er in der Gruppe Neuronale Grundlagen vokaler Kommunikation unter der Leitung von Daniela Vallentin am Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz in Seewiesen. Neben den Nachtigallen zählen die farbenprächtigen Bienenfresser zu seinen Lieblingsvögeln.

Spaghettiträger

Eine Brücke aus Schokolade erscheint auf den ersten Blick sinnlos. Aber wenn man die Leckerei schmilzt, Gummischlangen hinzufügt und wieder erkalten lässt, bricht die so verstärkte Tafel nicht: Die Fruchtgummischnüre halten sie vorerst zusammen. Dieser Mix aus Materialien zeigt Konstruktionsprinzipien, die in der Realität mit Beton und Stahl erzielt werden. Statik, Bauphysik, Materialwissenschaften – klingt kompliziert. Aber nicht bei Roma Agrawal: Die preisgekrönte Bauingenieurin hat ein Buch für Kinder geschrieben, in dem sie die Grundsätze der Konstruktion von Hochhäusern, Raketen oder Swimmingpools vorstellt und zum Nachbauen anregt. Anhand eines Pools aus Gummibärchen oder eines Raketen-Wärmeschutzes aus Eischnee können sie ausprobieren, wie Gelatine Behälter wasserdicht macht oder Baiser ein Eis im Innern

kühl hält – trotz Flambierbrenner. Dabei ist nicht nur das Bauen, sondern auch das Zerstören aufschlussreich: Wolkenkratzer aus Spaghetti, die man in Marshmallows gesteckt hat, sind wesentlich stabiler, wenn die Seiten mit über Kreuz gesteckten Nudeln verstärkt wurden. Die farbenfrohen Zeichnungen von Robert Sae-Heng machen Lust, die vorgeschlagenen Versuche selbst zu testen. Und manche Bauwerke können die Kinderkonstrukteure anschließend auch noch verspeisen.

Katja Engel

Roma Agrawal, Robert Sae-Heng
Wie man eine Schokoladenbrücke baut
 48 Seiten, Laurence King
 18,00 EUR



76



In Dialog treten

In einer Zeit multipler Krisen – neu aufbrechende geopolitische Konfliktlinien, eine sich zunehmend manifestierende Klimakrise und immer drängender werdende Verteilungsfragen – steht unsere Gesellschaft vor Herausforderungen wachsender Komplexität. Gerade vor diesem Hintergrund braucht es neue Formen des Austauschs. Der Soziologe Steffen Mau, Direktor am Max-Planck-Institut für Politik und Sozialwissenschaft, und die Grünen-Politikerin Ricarda Lang unterbreiten mit *Der große Umbruch* einen gelungenen Vorschlag: ein dialogisch angelegtes Buch, in dem beide ihre Perspektiven zu Themen wie Affektpolitik, der Krise der Staatlichkeit und der Aufmerksamkeitsökonomie im Gespräch darlegen. Modert wurde das Gespräch von Christof

Blume. Die Dialogform erweist sich dabei als kluge Entscheidung. Nicht zuletzt durch Maus ostdeutsche Sozialisierung und Langs westdeutsch geprägten Blick entwickelt sich ein Gespräch, das politische Abkürzungen vermeidet und stattdessen den Mut hat, Fragen zu verhandeln, auf die es keine vorgefertigten Antworten gibt. So entsteht ein wertvoller Austausch zwischen Wissenschaft und Politik, der vor Augen führt, wie notwendig der Dialog zwischen beiden Disziplinen ist.

Anna Franziska Schulze

Ricarda Lang, Steffen Mau
Der große Umbruch
 400 Seiten, Ullstein
 24,99 Euro

Steinzeit im Kopf

In unserem digitalisierten und globalisierten Alltag wirken immer mehr Impulse auf uns ein. So wie viele andere warnt auch der Neurowissenschaftler Paul Goldsmith vor gravierenden Folgen für unsere Gesundheit, wie chronischem Stress, Konzentrationsschwierigkeiten oder Schlafproblemen. Für den Autor liegt die Ursache dieser Probleme in unserem Gehirn – denn trotz des atemberaubenden Tempos unserer Zeit funktioniert es immer noch nach uralten Prinzipien. Goldsmith erklärt die komplexen Funktionen des Gehirns sehr anschaulich, was den besonderen Reiz des Buches ausmacht. Demnach bräuchte es etwa stetig körperliche Aufgaben, um genügend Dopamin auszuschütten. „Im modernen Leben aber sind unsere Hindernisse nicht physisch, sondern kognitiv, und zudem dauerhaft: Terminfristen bei der Arbeit, die ständige Konkurrenz in den sozialen Medien oder Werbung für einen ganz unrealistischen Lebensstil.“ Um unseren natürlichen zerebralen Rhythmen und Mustern zu folgen, sollten wir uns daher mehr bewegen und körperliche Aufgaben meistern, gut erreichbare Ziele setzen und darüber wieder mehr ins Handeln kommen. Der Autor adressiert vor allem das Individuum und formuliert die gesellschaftlichen Implikationen leider nicht konsequent aus – das gilt auch für den Befund, dass unser Gehirn stets nur Interpretationen liefert, keine absoluten Wahrheiten. Trotzdem kann und sollte das Buch auch als übergeordnetes Plädoyer gegen kollektive Überreizung und Überforderung gelesen werden.

Anne-Kathrin Weber

Paul Goldsmith
Die Evolution des Gehirns
432 Seiten, Piper
24,00 Euro



NEU ERSCHIENEN

Eine Geschichte von allem

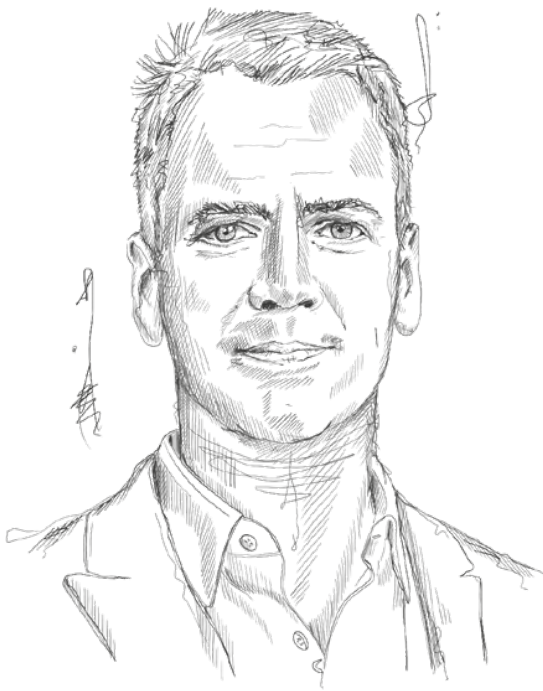
Es ist ein ehrgeiziges Projekt, das sich der Astrophysiker Heino Falcke und der Journalist Jörg Römer vorgenommen haben: Geht es doch um nichts weniger als um alles! Denn auf gut 400 Seiten entwerfen sie die Geschichte des Universums, der Erde, des Lebens und der menschlichen Kultur bis in die Gegenwart – und wagen zum Schluss auch noch einen Blick in die Zukunft unserer Zivilisation und des Kosmos als Ganzem. Kann eine derart universelle Erzählung zwischen Urknall und Apokalypse gelingen? Ja, und sogar sehr gut! Naturgemäß ist der „Reiseführer durch Raum und Zeit“, wie Falcke das Buch im Vorwort nennt, nicht vollständig. Aber beim Lesen des flüssig geschriebenen und jederzeit verständlichen Textes beschleicht einen nie das Gefühl, Wesentliches zu versäumen. Dafür ist der Erkenntnisgewinn hoch. In zehn Kapiteln geht es um die Geburt des Weltalls, um die Entwicklung von Galaxien, Sternen und Planeten, die Entstehung der Erde und das Auftreten des Menschen, der schließlich mit wissenschaftlichen Methoden die Welt erkundet. Im letzten Kapitel beschäftigen sich die bei-



den Autoren mit dem Ende von Sonne, Erde, Universum. Und der Mensch? Der sieht sich schon heute mit mannigfaltigen Herausforderungen wie dem Klimawandel konfrontiert. Heino Falcke, ehrenamtlicher Predikant der Evangelischen Kirche, hat jedoch Hoffnung, dass wir die Geschichte unseres Planeten noch lange weiterschreiben: „Dazu brauchen wir ein neues kosmisches Bewusstsein und ein Denken über Generationen hinweg.“

Helmut Hornung

Heino Falcke mit Jörg Römer
Zwischen Urknall und Apokalypse
448 Seiten, Klett-Cotta
28,00 Euro



FÜNF FRAGEN AN

Rodger Novak

Genschere für die Medizin

78

Eine einzige genetische Mutation kann enorme Auswirkungen auf die Gesundheit haben. Mit der Geneditierung lassen sich Fehler im Erbgut gezielt korrigieren. Bislang unheilbare Krankheiten können mit der Therapie geheilt werden.

Was versteht man unter Geneditierung?

RODGER NOVAK: Geneditierung bezeichnet die gezielte Veränderung des Erbguts. Das dafür eingesetzte Werkzeug heißt Crispr-Cas. Es funktioniert wie eine molekulare „Schere“ für Gene, mit der sich einzelne DNA-Bausteine herauschneiden und durch andere ersetzen lassen. Die Technik funktioniert besonders präzise und lässt sich vergleichsweise schnell und günstig durchführen. Sie öffnet die Tür zu neuen Behandlungsmöglichkeiten für Krankheiten, die bislang nicht behandel- oder gar heilbar waren.

Bei welchen Erkrankungen kann die Geneditierung eingesetzt werden?

Für manche erblichen Blutkrankheiten wie der Sichelzellenanämie oder der Beta-

Thalassämie gibt es bereits Therapien der Geneditierung, die Patientinnen und Patienten tatsächlich heilen. Diese Erkrankungen lassen sich vergleichsweise gut behandeln, da die zu editierenden Stammzellen dem Körper entnommen und nach erfolgter Genveränderung wieder dem Körper zurückgegeben werden können.

Wie sicher sind solche Therapien?

Wie jede Behandlung ist auch die Geneditierung nicht völlig risikofrei. Moderne Crispr-Therapien arbeiten zwar sehr präzise, aber es lässt sich nicht komplett ausschließen, dass die Genschere an der falschen Stelle im Erbgut schneidet. Das größere Risiko stellen derzeit jedoch die Transportvehikel der Genschere dar. Werden virusähnliche Partikel als Genfähren für die DNA der Genschere eingesetzt, können diese bei hohen Dosen heftige Immunreaktionen auslösen. Der Transport der Genschere selbst in Nanopartikeln wiederum birgt ein Risiko für die Leber.

Was sind die größten wissenschaftlichen Herausforderungen?

Derzeit lassen sich vor allem kleine Veränderungen im Erbgut zuverlässig vornehmen, nicht aber komplexe genetische Eingriffe, etwa an größeren DNA-Abschnitten oder

mehreren Genen parallel. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, die Genschere in die richtigen Organe und Zellen zu bringen. Für Zellen im Blut ist dies vergleichsweise einfach. Ansonsten gelingt dies bislang nur in leicht zugänglichen Organen wie der Leber.

Welche ethischen Fragen sind mit der Geneditierung in der Medizin verbunden?

Während medizinische Anwendungen an Körperzellen ethisch weitestgehend unbedenklich sind, sind Eingriffe an Keimzellen umstritten. Dabei werden Ei- oder Samenzellen genetisch verändert. Da diese Mutationen an kommende Generationen weitergegeben würden, lehnen die meisten Expertinnen und Experten eine Geneditierung der Keimzellen ab.

Harald Rösch

Rodger Novak ist Mitbegründer und ehemaliger Vorstandsvorsitzender von CRISPR Therapeutics

- Institut / Forschungsstelle
- Teilinstitut / Außenstelle
- Sonstige Forschungseinrichtungen
- Assoziierte Forschungseinrichtungen

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

- Jupiter, Florida

Brasilien

- Manaus

Luxemburg

- Luxemburg



79

Impressum

MaxPlanckForschung wird herausgegeben von der Wissenschafts- und Unternehmenskommunikation der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V., vereinsrechtlicher Sitz: Berlin. ISSN 1616-4172

Redaktionsanschrift

Hofgartenstraße 8
80539 München
089 2108-1719 /-1276 (vormittags)
mpf@gv.mpg.de
www.mpg.de/mpforschung
Kostenlose App: www.mpg.de/mpfmobil

Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung

Peter Hergersberg (Chemie, Physik, Technik; -1536)

Redaktion

Dr. Tobias Beuchert (Astronomie, Physik, Technik; -1404)
Michaela Hutterer (Kultur, Gesellschaft, -2617)
Petra Maaß (Kultur, Gesellschaft, -1488)
Dr. Elke Maier (Biologie; -1064)
Dr. Harald Rösch (Biologie, Medizin; -1756)

Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)
Annabell Kopp (-1819)

Konzeptionelle Beratung

Sandra Teschow und Thomas Susanka
www.teschowundsusanka.de

Gestaltung

GCO Medienagentur
Beethovenstraße 2
86420 Diedorf
www.gco-agentur.de

Druck & Vertrieb

Vogel Druck & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg

Anzeigenleitung

Philipp Bender
Bertelsmann Marketing Services
Tel: 49 173 60 55 713
philipp.bender@bertelsmann.de

MaxPlanckForschung berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den Max-Planck-Instituten und richtet sich an ein breites wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemein verständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und in englischer Sprache (*MaxPlanckResearch*) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr. Die Auflage dieser Ausgabe beträgt 75 000 Exemplare (*MaxPlanckResearch*: 10 000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in *MaxPlanckForschung* vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der Max-Planck-Gesellschaft und ihrer Organe interpretiert werden.

Die Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V. unterhält 85 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 24 000 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 13 000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Im Jahr 2025 betrug die Grundfinanzierung durch Bund und Länder 2,2 Milliarden Euro. Die Max-Planck-Institute betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die Max-Planck-Gesellschaft ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.

MaxPlanckForschung wird auf Papier aus vorbildlicher Forstwirtschaft gedruckt und trägt das Siegel des Forest Stewardship Council® (FSC®).



Zur besseren Lesbarkeit haben wir in den Texten teilweise nur die männliche Sprachform verwendet. Mit den gewählten Formulierungen sind jedoch alle Geschlechter gleichermaßen angesprochen.

Die MaxPlanckForschung
kostenfrei abonnieren:



MAX PLANCK
GESELLSCHAFT

