

Ausgabe 04 | 2022

MAX PLANCK

Forschung

RECHTSWISSENSCHAFT

Emojis vor Gericht

CHEMIE

Treibhausgas unter Strom

PHYSIK

Brennpunkte der Kernfusion



DRAHT ZUR WELT



FOTO: ADOBE STOCK / CHEPKO DANIL

Unser Sinne sind unser Draht zur Welt. Durch sie erhält das Gehirn lebensnotwendige Informationen über unsere Umwelt. Kinder üben spielerisch, damit umzugehen, und machen dabei essenzielle Erfahrungen fürs Leben.

EDITORIAL

Liebe Leserin, lieber Leser

Nach Aristoteles besitzt der Mensch fünf Sinne. Andere sprechen von sechs oder sieben, Rudolf Steiner und seiner anthroposophischen Sinneslehre zufolge besitzen wir sogar zwölf. Wie viele Sinne wir haben, ist also auch Geschmackssache.

Wie wichtig unsere Sinne für unser Leben sind, zeigt sich, wenn einer fehlt. Menschen mit Hörstörungen zum Beispiel fällt es schwer, Kontakte zu Mitmenschen zu knüpfen. Eine neue Technik soll Betroffenen, denen ein Hörgerät nicht helfen kann, das Hören erleichtern. Ein entscheidendes Element dabei ist ein lichtempfindliches Protein, das ursprünglich aus Algen stammt.

Hören ist das eine – wie wir das Gehörte wahrnehmen, das andere. Das gilt insbesondere für Musik. So bestimmen Kultur und Hörgewohnheiten, wie wir Rhythmen empfinden. Ob indigene Völker im Amazonas, Menschen in Korea oder den Vereinigten Staaten – jede Kulturgruppe hat ihre eigene musikalische Welt im Kopf. Ein beliebtes Kinderspiel hilft Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die unterschiedlichen Wahrnehmungen von Rhythmen zu untersuchen.

Andere Sinne sind uns dagegen eher fremd. Der Sinn für Magnetfelder zum Beispiel. Vögel besitzen ihn, Amphibien, Fische und Fledermäuse auch. Und Graumulle. Die Nagetiere mit den monströsen Schneidezähnen nehmen das Magnetfeld der Erde wahr und können auf diese Weise in ihren unterirdischen Kolonien navigieren. In einem Labyrinth stellen die Tiere ihre Orientierungskünste für die Wissenschaft unter Beweis.

Viel Spaß beim Lesen wünscht Ihnen

Ihr Redaktionsteam



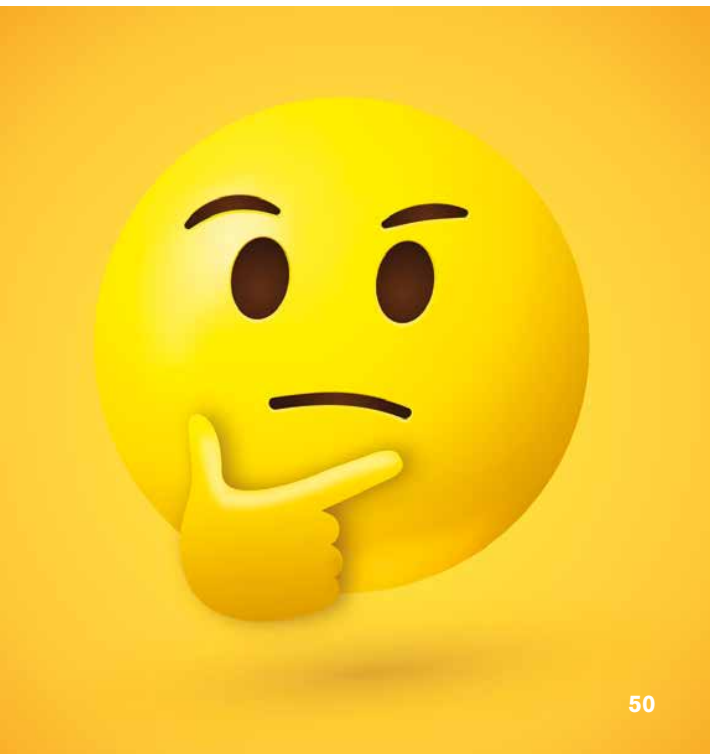
30 | SENSIBILISIERT

Die Sinneszellen der Cochlea leiten Schallsignale an den Hörnerv weiter.



42 | ENGAGIERT

Krishna Gummedi will Algorithmen transparenter und fairer machen.



50 | INTERPRETIERT

Gerichte müssen entscheiden, was Emojis in der Onlinekommunikation ausdrücken.



62 | ISOLIERT

Die Wand einer Fusionskammer soll möglichst nicht von einem Plasma berührt werden.

BILDER: SCIENCE PHOTO LIBRARY / FURNESS; DR. DAVID (LINKS OBEN); ANNA ZIEGLER FÜR MPG (RECHTS OBEN); ADOBESTOCK / VILMOS (LINKS UNTEN); JAN HOSAN / MPI FÜR PLASMAPHYSIK (RECHTS UNTEN)

03 | EDITORIAL

06 | ORTE DER FORSCHUNG

Asteroid Ryugu

08 | NOBELPREIS 2022

10 | KURZ NOTIERT

18 | ZUR SACHE

Zurückhaltung zahlt sich aus

In der Eurozone herrscht eine so hohe Inflation wie lange nicht mehr. Die Gewerkschaften reagieren bislang mit besonnenen Lohnforderungen, nun ist auch eine kluge Zinspolitik nötig.

22 | INFOGRAFIK

Schriften im Wandel

IM FOKUS

Draht zur Welt

24 | HÖRT SICH ANDERS AN

In verschiedenen Kulturen nehmen Menschen Musik unterschiedlich wahr. Wie sie auf Rhythmen und Töne reagieren, liefert nicht nur Erkenntnisse über Musik.

30 | LICHT GEHT INS OHR

Menschen mit Hörproblemen sind in ihrem Alltag sehr eingeschränkt, nicht nur beim Genuss eines Konzerts. Künftige Hörhilfen sollen ihnen differenzierteres Hören ermöglichen.

36 | NAGER MIT INNEREM KOMPASS

Graumulle navigieren mithilfe des Erdmagnetfelds durch ihre dunklen Höhlen. Wie ihr Magnetsinn funktioniert, wird nun klarer.

42 | BESUCH BEI

Krishna Gummadi

48 | ZWEITER BLICK

WISSEN AUS

50 | „EMOJIS STELLEN DAS RECHT AUF DIE PROBE“

Smileys, gehobene und gesenkte Daumen, aber auch manch unflätiges Symbol gehören heute zur Onlinekommunikation – mit teilweise überraschenden juristischen Konsequenzen.

54 | TREIBHAUSGAS UNTER STROM

CO₂ lässt sich als Rohstoff für wichtige Chemikalien und Treibstoffe nutzen. Der Schlüssel dazu sind geeignete Katalysatoren.

62 | BRENNPUNKTE DER KERNFUSION

Die Kernfusion könnte praktisch unbegrenzt saubere Energie liefern. Forschungseinrichtungen und Start-ups müssen auf dem Weg zu Fusionskraftwerken aber noch viele Hürden nehmen.

70 | POST AUS ...

Kangiqsujuaq, Kanada

72 | NEU ERSCHIENEN

74 | FÜNF FRAGEN

zu neuen digitalen Kompetenzen

75 | IMPRESSUM

TECHMAX

Digitale Zwillinge der Erde – wie Forschung physikalische Klimamodelle entwickelt



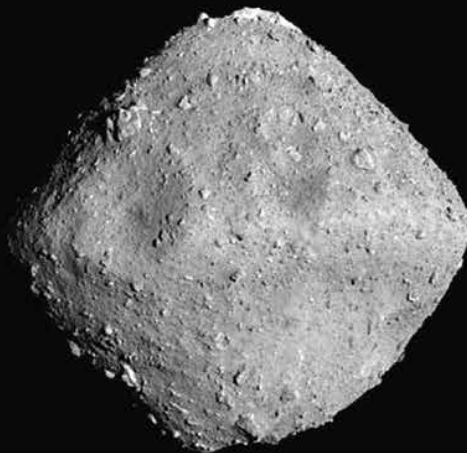
6 **S**eine Form ähnelt der eines Diamanten, und tatsächlich ist er für die Wissenschaft so etwas wie ein Schatz: Ryugu, ein rund einen Kilometer großer Asteroid, der in 475 Tagen einmal die Sonne umläuft und dabei die Erdbahn kreuzt. Aber keine Sorge, gefährlich wird uns der kosmische Brocken nicht. Seit ein paar Jahren steht er im Fokus der Forschung – und hat auch schon Besuch bekommen. So schickte die japanische Raumfahrtbehörde 2014 eine Sonde namens Hayabusa 2 zu dem Himmelskörper. Nach der Entnahme von Bodenproben flog der Kundschafter zurück und setzte seine Flaschenpost mit der wertvollen Fracht im Dezember 2020 nahe der australischen Stadt Woomera ab.

Insgesamt fünf Gramm aus dem „Drachenpalast“, so die Übersetzung für „Ryugu“ aus dem Japanischen, landeten in irdischen Labors und wurden nach allen Regeln der Messkunst analysiert. Das Material zeigt eine lockere, körnige Struktur und hat offenbar über einen langen Zeitraum mit Wasser reagiert. Außerdem fanden sich Aminosäuren und andere komplexe organische Moleküle.

Wo aber ist Ryugu entstanden? Er bewegt sich zwar vergleichsweise nahe an der Sonne, dürfte aber von weiter draußen stammen. Dies jedenfalls zeigen Studien, an denen das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung und die Universität Göttingen beteiligt sind. Demnach liegt die Geburtsstätte des Drachenpalasts am äußeren Rand des Planetensystems. Dort sind vor mehr als 4,5 Milliarden Jahren die Mutterkörper von kohlenstoffreichen Asteroiden und Kometen entstanden – unter anderem von Ryugu. Als die Gas- und Eisriesen Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun heranwuchsen, wirbelte ihn dann das Spiel der Kräfte auf eine turbulente Reise in Richtung Sonne.

Die Rotation von Ryugu
[https://de.wikipedia.org/wiki/\(162173\)_Ryugu#/media/Datei:Ryugu_rotation.gif](https://de.wikipedia.org/wiki/(162173)_Ryugu#/media/Datei:Ryugu_rotation.gif)

ORTE DER FORSCHUNG



7

BILD: JAXA, UNIVERSITY OF TOKYO & COLLABORATORS

„Entscheidend für unseren Erfolg
war die langfristige und groß-
zügige Unterstützung durch die
Max-Planck-Gesellschaft.“



FOTO: ANNA SCHROLL FÜR MPG

NOBELPREIS FÜR MEDIZIN

SVANTE
PÄÄBO



Die ringförmigen DNA-Moleküle in den Mitochondrien sind sehr viel kleiner als die DNA im Zellkern und daher leichter zu analysieren. Nach dem Tod eines Organismus zerfällt das Erbgut in unterschiedlich lange Fragmente. Die allermeiste DNA stammt jedoch von Mikroorganismen.

Die Frage, ob DNA in den Knochen vor langer Zeit verstorbener Tiere und Menschen überdauern und deren Abstammung und Verwandtschaft verraten kann, hat Svante Pääbo viele Jahre beschäftigt. Für seine Forschungsergebnisse ist der Wissenschaftler nun mit dem Nobelpreis für Physiologie oder Medizin ausgezeichnet worden.

Aus alten Knochen Erbgut zu isolieren, ist wahrlich eine Herausforderung, denn alte DNA zerfällt in kleine Fragmente und wird mit der Zeit chemisch verändert. Außerdem ist sie nach vielen Jahren nur noch in winzigen Mengen vorhanden, verglichen mit der DNA von Bakterien und Pilzen, welche die Knochen im Boden besiedelt haben. Daher hat Pääbos Gruppe Techniken entwickelt, mit denen diese Probleme ausgeräumt werden können. Dar- aus ist ein neues Forschungsgebiet entstanden: die Paläogenomik. Forschende wollen dabei aus Funden die evolutionären Beziehungen von Tieren, Pflanzen oder Krankheits- erregern rekonstruieren.

Svante Pääbos eigene Forschung am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig konzentriert sich auf ausgestorbene Formen des Menschen. 1997 entschlüsselten er und sein Team das mitochondriale Genom eines Neandertalers und damit die ersten DNA-Sequenzen dieser vor rund 40 000 Jahren ausgestorbenen Menschenform. Da das mitochondriale Genom in vielen Kopien in den Zellen vorkommt, ist es leichter zu sequenzieren. Die Analysen ergaben, dass sich die Neandertaler deutlich vom modernen Menschen unterscheiden. Für einen umfassenden Überblick über die genetische Geschichte der Neandertaler mussten die Forschenden jedoch das gesamte Erbgut untersuchen.

Angeregt durch die Entwicklung neuer Sequenzierungstechnologien initiierte Pääbo 2006 ein ehrgeiziges, von der Max-Planck-Stiftung unterstütztes Gemeinschaftsprojekt zur Entschlüsselung des Neandertaler-Genoms. Im Jahr 2010 veröffentlichten die Forschenden einen ersten Entwurf. Die Daten zeigten, dass heute lebende Menschen, deren genetische Wurzeln außerhalb Afrikas liegen, etwa zwei Prozent Neandertaler-DNA in sich tragen. Neandertaler und moderne Menschen haben sich folglich in ihrer evolutionären Geschichte mitei-

einander gemischt. Da Menschen häufig unterschiedliche Neandertaler-DNA-Abschnitte besitzen, ist mindestens die Hälfte des Neandertaler-Genoms bis zum heutigen Tag im Menschen vorhanden.

Bei der Sequenzierung von DNA aus alten menschlichen Überresten hat Pääbos Forschungsgruppe darüber hinaus eine zuvor unbekannte Form des Menschen entdeckt. Die nach dem Fundort der Knochen – einer Höhle im südlichen Sibirien – benannten „Denisovaner“ waren entfernte Verwandte der Neandertaler. Sie steuerten ihrerseits Erbgut zu den heute in Asien lebenden Menschen bei.

Svante Pääbo und sein Team erforschen nun die wichtigsten Unterschiede zwischen heutigen Menschen, Neandertalern und Denisovanern. Darüber hinaus wollen sie herausfinden, welche Auswirkungen die Neandertaler- und Denisovaner-Genvarianten haben, die im Erbgut heutiger Menschen vorkommen. Einige Varianten von Neandertalern erhöhen beispielsweise die Schmerzempfindlichkeit von uns Menschen, andere verringern die Gefahr von Fehlgeburten während der Schwangerschaft. Wieder andere erhöhen das Risiko, bei einer Infektion mit Sars-CoV-2 schwer zu erkranken.

IMPULS FÜR DIE INDUSTRIE

Eine Ausgründung aus dem Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie stärkt seit Kurzem die Pflanzenschutzforschung der Firma Bayer. Das deutsche Biotech-Start-up Targenomix, das neuartige Methoden der Systembiologie und der

Computational Life Sciences nutzt, soll dem Chemie- und Pharmakonzern wichtige Impulse bei der Suche nach neuen Wirkmechanismen für Pflanzenschutzmittel geben. Mit dem Kauf will Bayer die Entdeckung und die Entwicklung von Molekülen be-

schleunigen, die das Potenzial haben, die landwirtschaftliche Produktion trotz Herausforderungen wie dem Klimawandel nachhaltiger zu gestalten und die Unkraut-, Krankheits- und Insektenresistenz von Pflanzen zu erhöhen. www.mpg.de/19476657



FOTO: SHAHITH/ADOBE STOCK

Aus der Forschung in die Anwendung: Das Biotech-Start-up Targenomix soll die Fähigkeiten von Bayer im Bereich Pflanzenschutz erweitern.

ZENTRUM FÜR GRÜNE CHEMIE

Im Wettbewerb um den Aufbau von Forschungszentren in bisherigen Kohleregionen hat sich ein Konzept von Max-Planck-Wissenschaftlern durchsetzen können. Das Bundesforschungsministerium, der Freistaat Sachsen und das Land Sachsen-Anhalt haben aus knapp hundert Vorschlägen unter anderem das Konzept für das Center for the Transformation of Chemistry (CTC) ausgewählt. Ziel des neuen Zentrums ist es, die Chemiewirtschaft durch die Entwicklung nachhaltiger Produktionsprozesse auf Basis nachwachsender Rohstoffe und recycelter Materialien in eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu transformieren. Die Idee dafür stammt von Peter H. Seeberger und Matthew Plutschack vom Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung. Das CTC soll mit jährlich bis zu 170 Millionen Euro institutionell gefördert werden.

www.mpg.de/19306911



FOTO: HDR GERMANY

Neues Forschungsgelände: Die Visualisierung zeigt das Center for the Transformation of Chemistry auf dem Grundstück der ehemaligen Zuckerfabrik in Delitzsch bei Leipzig.

AUSGEZEICHNET*

SARAH O'CONNOR

Für ihre grundlegenden Entdeckungen zur pflanzlichen Naturstoffbiosynthese erhält Sarah Ellen O'Connor, Direktorin am Max-Planck-Institut für Chemische Ökologie, den Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Die Chemikerin erforscht Biosynthesewege in Pflanzen mit dem Ziel, die Synthese komplexer Naturstoffe wie etwa krebshemmender oder neuroaktiver Stoffe zu entschlüsseln.



FOTO: SEBASTIAN REUTER

FOTO: JÉRÉMIE BOISSIER / IRAM



Ohr ins All: Das NOEMA-Observatorium mustert mit seinen Antennen das Universum im Radiobereich.

ERWEITERTE HORIZONTE

Das NOEMA-Radioteleskop auf dem Plateau de Bure in den französischen Alpen ist jetzt mit zwölf Antennen ausgestattet und damit das leistungsstärkste Radioteleskop seiner Art auf der nördlichen Halbkugel. Acht Jahre nach der Einweihung der ersten NOEMA-Antenne ist das europäische Großprojekt nun vollendet. Dank seiner zwölf Antennen, die sich auf einem speziellen Schienensystem von bis zu 1,7 Kilometern Länge hin und her bewegen lassen, ist NOEMA

ein einzigartiges Instrument für die astronomische Forschung. Bei Beobachtungen agieren die zwölf Antennen wie ein einziges Teleskop. Die maximale räumliche Auflösung von NOEMA ist so hoch, dass das Observatorium in der Lage wäre, ein Mobiltelefon aus mehr als 500 Kilometern Entfernung zu erkennen. Betrieben wird das Teleskop vom internationalen Institut IRAM, an dem die Max-Planck-Gesellschaft beteiligt ist. www.mpg.de/19315178

FÜR FREIHEIT IM IRAN

11

Die Max-Planck-Gesellschaft erklärt sich solidarisch mit den Studierenden sowie den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern im Iran in ihrem Wunsch nach mehr Freiheitsrechten. Sie verurteilt das brutale Vorgehen der Sicherheitskräfte und fordert die sofortige Freilassung aller im Zuge der Proteste Verhafteten. Freiheitsrechte sind ein hohes Gut. Die Meinungs-, Presse- und Wissenschaftsfreiheit sind zudem Voraussetzung für erfolgreiche internationale wissenschaftliche Kooperationen. Die Max-Planck-Gesellschaft möchte die über Jahrzehnte aufgebauten Beziehungen mit ihren iranischen Wissenschaftspartnern erhalten und die Zusammenarbeit auch unter diesen sehr schwierigen Bedingungen fortsetzen.

www.mpg.de/19436297

GENETIK DER LEGASTHENIE

Es ist bekannt, dass Legasthenie – zum Teil aufgrund genetischer Faktoren – in manchen Familien gehäuft auftritt. Bislang wusste man aber nur wenig über die beteiligten Gene. Ein internationales Forschungsteam, darunter Mitarbeitende des Max-Planck-Instituts für Psycholinguistik in Nijmegen, hat nun 42 Gene identifiziert, die eindeutig mit Legasthenie in Verbindung stehen. Etwa ein Drittel der genetischen Varianten wurden zuvor schon mit allgemeinen kognitiven Fähigkeiten und dem Bildungserfolg assoziiert.

www.mpg.de/19388671

ANTRIEB FÜR DEN SONNENWIND

Unsere Sonne bläst ständig einen Strom unterschiedlich schneller, geladener Teilchen in den Weltraum. Ein besonders starker Sonnenwind kann Polarlichter erzeugen oder die Satellitenkommunikation stören. Die schnellen Sonnenwinde mit Geschwindigkeiten von mehr als 500 Kilometern pro Sekunde stammen aus dem Innern der koronalen Löcher. Das sind Regionen, die in der ultravioletten Strahlung der solaren äußeren Gasatmosphäre (Korona) dunkel erscheinen. Der Ursprung langsamer Sonnenwinde, die auch mit Überschallgeschwindigkeiten von 300 bis 500 Kilometern pro Sekunde wehen, war bisher weniger klar. Jetzt hat ein Team unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung

mithilfe des amerikanischen Satelliten GOES in der mittleren Sonnenkorona ein dynamisches Netz langgezogener, verwobener Plasmastrukturen sichtbar gemacht. Das Ultraviolett-Teleskop blickte in eine Region, die bisher noch nicht erforscht war. In Verbindung mit den Messdaten anderer Raumsonden sowie Computersimulationen zeigt sich ein klares Bild: Das heiße Sonnenplasma fließt in der mittleren Korona entlang der offenen Magnetfeldlinien des koronalen Netzes. Da, wo sich die Feldlinien kreuzen und miteinander wechselwirken, wird Energie freigesetzt – und dadurch werden die Teilchen der langsamen Sonnenwinde beschleunigt.

www.mpg.de/19550503

12

Die Atmosphäre der Sonne: Strahlenartige Strukturen in diesem Schnappschuss aus einer Computersimulation zeigen die Architektur des beobachteten koronalen Netzes.

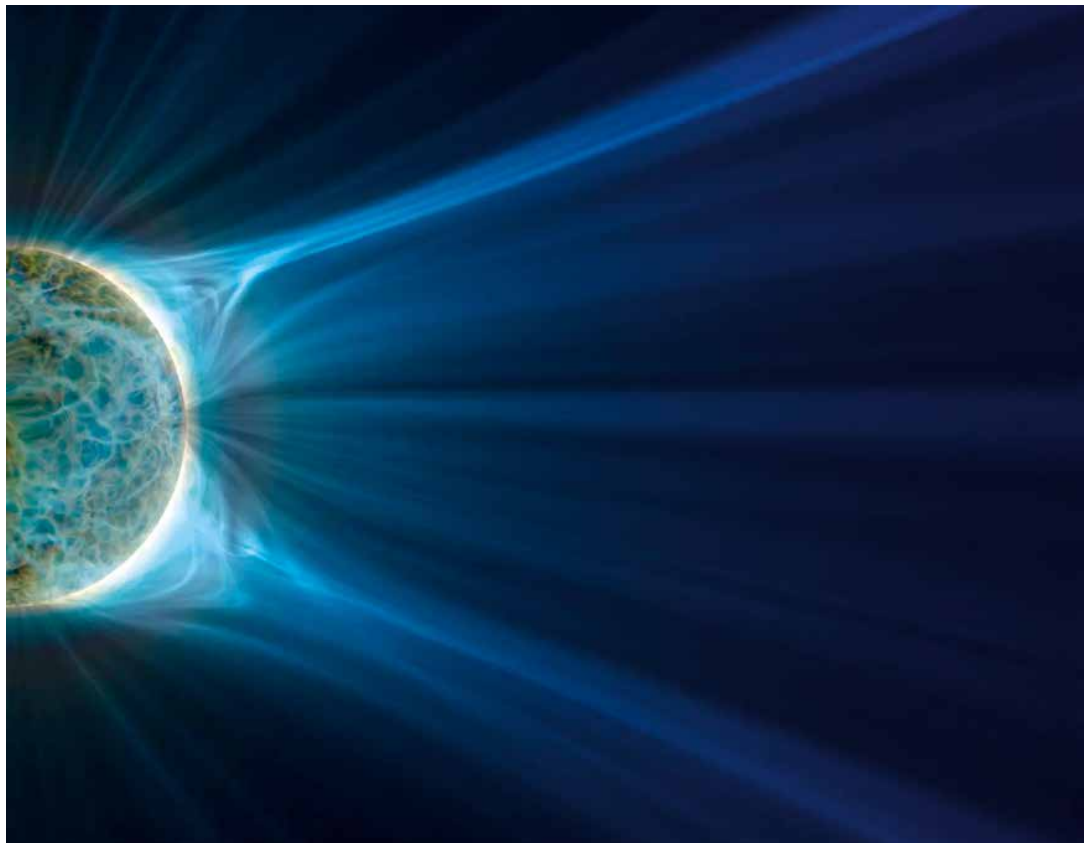


BILD: NATURE ASTRONOMY, CHITTA ET AL.

ENERGIESCHUB FÜR AKKUS

Eine Erfindung von Forschenden des Max-Planck-Instituts für medizinische Forschung könnte Batterien künftig deutlich leichter, effizienter und sicherer machen. Das Team hat einen Weg gefunden, sehr feine Metallvliese zu erzeugen, die als Stromsammler in den Elektroden von Akkus dienen und die bislang verwendeten Aluminium- und Kupferfolien ablösen könnten. Die Metallvliese ermöglichen es, die Dicke der Batteriezellen auf das Zehnfache heute üblicher Zellen zu erhöhen und damit Material und Gewicht einzusparen. Da die Metallvliese im Vergleich zu

den herkömmlichen Stromkollektoren eine deutlich größere Oberfläche aufweisen, lassen sich Akkus mit solchen Stromkollektoren wesentlich schneller be- und entladen. Zudem reduziert das Metallgewebe den elektrischen Widerstand der Elektroden und erhöht deren mechanische Stabilität, was die Batterien sicherer macht. Die Batene GmbH, eine Ausgründung des Instituts, hat die Erfindung lizenziert und vermarktet sie nun. Dafür hat das Start-up von Investoren zehn Millionen Euro Anschubfinanzierung erhalten.

www.mpg.de/19462373/



FOTO: HANNAH ROWLAND

Das Tagpfauenauge (*Aglais io*) hat auf jedem Vorder- und Hinterflügel Augenflecken – es scheint, als ob diese Betrachtende ansehen.

FALTERFLÜGEL MIT MONA-LISA-EFFEKT

Einige Schmetterlinge tragen auffällige Markierungen auf ihren Flügeln. Solche Augenflecken sollen Räuber von einem Angriff abhalten. Forschende des Max-Planck-Instituts für chemische Ökologie in Jena haben die abschreckende Wirkung der Flecken untersucht und frisch geschlüpfte Kücken dabei beobachtet, wie sie künstliche Falter mit Augenflecken auf den Flügeln attackierten. Die Innenkreise der Flecken waren so ausgerichtet, dass die Schein-Augen nach vorne, nach links oder nach rechts zu blicken schienen. Die Forschenden stellten fest, dass die Kücken ihre

Beute dann zögerlicher angriffen, wenn sie sich aus der vermeintlichen Blickrichtung der Augenflecken näherten. Faltern mit konzentrischen Kreis-Augen näherten sich die Kücken aus allen Richtungen mit großer Vorsicht. Der Grund dafür ist offenbar der sogenannte Mona-Lisa-Effekt – benannt nach dem Porträt von Leonardo da Vinci, dessen Pupillen symmetrisch in der Iris liegen und die den Betrachter dadurch überallhin zu verfolgen scheinen. Ebenso scheinen die Augen auf den Falterflügeln Räuber in alle Richtungen anzustarren.

www.mpg.de/19376368

Neandertaler-Vater mit seiner Tochter.



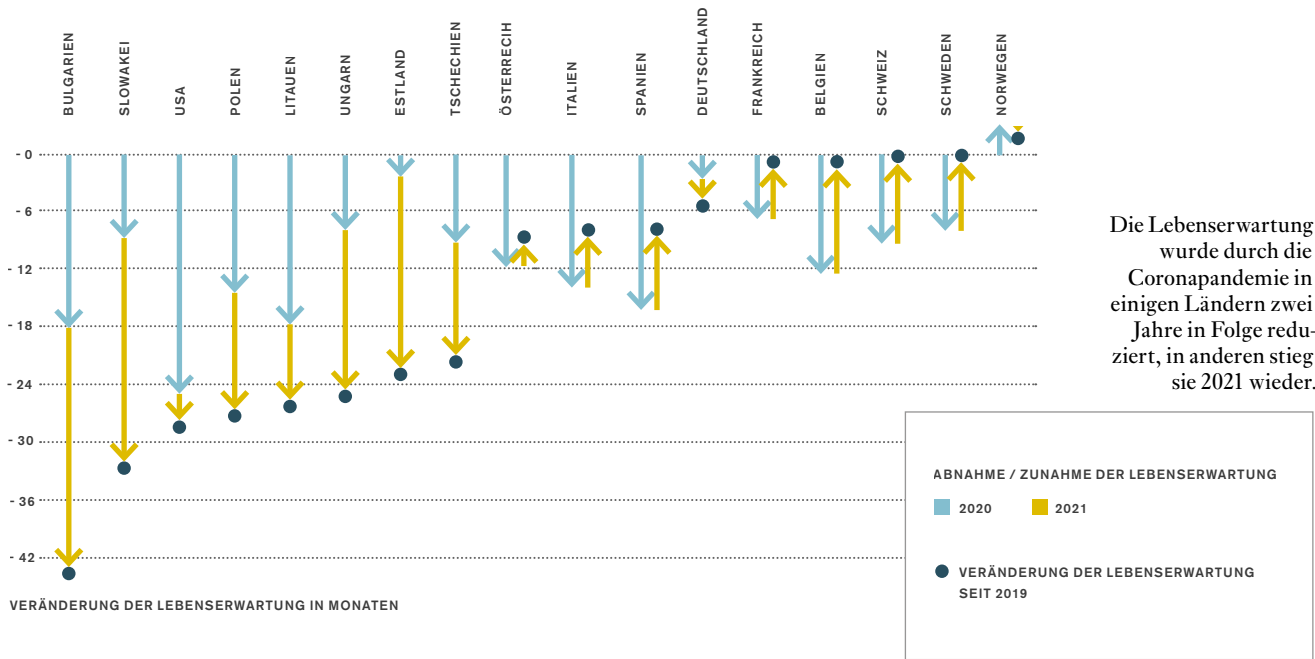
BILD: TOM BJORKLUND

FAMILIE AUS DER URZEIT

13

Das südliche Sibirien war vor 54.000 Jahren die Heimat einer Gruppe von Neandertalern aus mindestens acht Erwachsenen und fünf Jugendlichen. In der Sippe lebten ein Vater mit seiner Tochter und ein kleiner Junge sowie dessen Cousine, Tante oder Großmutter. Die Frühmenschen jagten in Flusstälern Steinböcke, Pferde, Bisons und sammelten das Material für ihre Steinwerkzeuge. Forschende des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig sind auf diese Großfamilie durch die Analyse von DNA in Knochen gestoßen, die in zwei Höhlen des Altai-Gebirges in Zentralasien gefunden worden waren. Die extrem geringe genetische Vielfalt legt nahe, dass die Sippe nur aus zehn bis zwanzig Individuen bestand, die wenig genetischen Austausch mit anderen Gruppen hatte. Bindeglieder zwischen verschiedenen Großfamilien waren in erster Linie Frauen – sie wechselten offenbar häufiger als Männer von ihrer Geburtsgruppe in eine andere.

www.mpg.de/19369849



Die Lebenserwartung wurde durch die Coronapandemie in einigen Ländern zwei Jahre in Folge reduziert, in anderen stieg sie 2021 wieder.

CORONA VERKÜRZT LEBENSZEIT

14

Wegen der Coronapandemie ist die Perioden-Lebenserwartung 2021 in vielen westlichen Ländern das zweite Jahr in Folge gesunken. Das ergab eine Studie unter Beteiligung des Max-Planck-Instituts für demografische Forschung in 27 europäischen Ländern, in den USA und Chile. Die Perioden-Lebenserwartung ist ein Maß für das Sterberisiko, dem eine Bevölkerung innerhalb eines Jahres ausgesetzt ist. In Deutschland stieg der Verlust der Perioden-Lebenserwartung 2021 mit 3,1 Monaten

stärker an als 2020. Insgesamt fiel jedoch der Rückgang für beide Pandemiejahre zusammen mit 5,7 Monaten vergleichsweise moderat aus. In Teilen Osteuropas ist die Sterblichkeitskrise dagegen noch einmal erheblich schlimmer geworden. So verringerte sich in Bulgarien die Perioden-Lebenserwartung 2021 um 2,1 Jahre. Im Vergleich zum Vor-Pandemie-Niveau ist sie damit um 3,6 Jahre gesunken. Mehr als ein Viertel der Verluste ist auf eine erhöhte Sterblichkeit bei den 40- bis 60-Jährigen zurück-

zuführen. Bulgarien hatte bis Herbst 2021 die geringste Impfquote aller untersuchten Länder. Zusätzlich dürften dort – ebenso wie in anderen osteuropäischen Ländern – die schlechtere Gesundheitsversorgung und deutlich schwierigere Lebensbedingungen eine Rolle spielen. Nur in Frankreich, Belgien, Schweden und der Schweiz stieg die Perioden-Lebenserwartung 2021 wieder auf das Vor-Pandemie-Niveau. In Norwegen erhöhte sie sich trotz Pandemie sogar leicht.

www.mpg.de/19357068

ENERGIESPAREN BEGINNT IM KOPF

Im Winter hat es der Europäische Maulwurf nicht leicht: Sein Stoffwechsel – einer der schnellsten unter den Säugetieren – fordert ständig große Mengen an Futter, mehr, als in den kalten Wintermonaten zur Verfügung steht. Da er keinen Winterschlaf halten oder wegziehen kann, löst er dieses Problem auf ungewöhnliche Art: Er schrumpft sein Hirn. Forschende des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie

in Konstanz haben entdeckt, dass der Europäische Maulwurf im ersten Lebensjahr seinen Schädel und damit sein Gehirn im Winter um elf Prozent verkleinert und dann bis zum Sommer wieder um vier Prozent vergrößert. In den darauffolgenden Jahren halten sich die Zu- und Abnahme vermutlich die Waage. Iberische Maulwürfe verändern die Größe ihres Gehirns dagegen nicht, obwohl sie im trock-

nen Sommer in ihrer Heimat ebenfalls nur wenig Nahrung finden. Die Forschenden schließen daraus, dass nicht nur die knappe Nahrung, sondern auch die kalte Witterung die Verkleinerung des Gehirns antreibt. Neben dem Europäischen Maulwurf können auch Spitzmäuse, Hermeline und Wiesel ihr Gehirn im Winter schrumpfen lassen.

www.mpg.de/19237818

11

Prozent schrumpft das Gehirn des Maulwurfs im ersten Winter.

AUFMUNTERNDES GEZWITSCHER

Ein Forschungsteam des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung und des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf hat untersucht, wie sich Verkehrslärm und Vogelgesang auf die Psyche auswirken. In einem Onlineexperiment bekamen knapp dreihundert gesunde Testpersonen entweder Verkehrsgeräusche oder Vogelgezwitscher zu hören. Vor und nach den Hörproben wurde die mentale Gesundheit erfasst. Auch Gesunde können beispielsweise Angstgedanken oder zeitweise paranoide Wahrnehmungen haben. Das Hören von Verkehrslärm verschlimmerte in der Studie depressive Tendenzen. Der Klang von Vogelstimmen hingegen verringerte Ängstlichkeit und Paranoia bei den Teilnehmenden. Eine mögliche Erklärung für diese positiven Effekte ist, dass Vogelstimmen unerschwerlich mit einer intakten natürlichen Umgebung in Verbindung gebracht werden. Dadurch

wird die Aufmerksamkeit von psychischen Belastungen abgelenkt, und es stellt sich ein Gefühl von Sicherheit und Geborgenheit ein. Auf manifeste depressive Zustände scheint Vogelgesang dagegen kaum Einfluss zu haben. www.mpg.de/19363444



FOTO: AXEL GRIESCH

Tirili tut gut: Wer Vogelgesang hört, baut Ängste und paranoide Wahrnehmungen ab.

RÄTSEL UM DAS ERDNÄCHSTE SCHWARZE LOCH

In unserer Milchstraße gibt es schätzungsweise hundert Millionen schwarze Löcher. Bisher haben Forschende aber nur das Massemonster im galaktischen Zentrum direkt beobachtet, einige andere, viel kleinere hingegen nur mit indirekten Methoden. Kürzlich war auch der Astrometriemission Gaia erfolgreich: Er bemerkte winzige Positionsänderungen eines Sterns – so, als ob ein unsichtbares Begleitobjekt an ihm zerren würde. Offenbar handelt es sich um ein Doppelsystem, bestehend aus dem sichtbaren, sonnenähnlichen Stern und dem unsichtbaren schwarzen Loch mit etwa zehn Sonnenmassen. Bei einer Entfernung von 1560 Lichtjahren ist es das der Erde am nächsten gelegene. Das Gaia BH1 ge-

nannte System gibt dem Team um Kareem El-Badry vom Max-Planck-Institut für Astronomie allerdings einige Rätsel auf. So ist etwa unklar, wie es überhaupt entstehen konnte. Der Vorgängerstern, der später zum schwarzen Loch mutierte, müsste eine Masse von mindestens zwanzig Sonnenmassen und eine sehr kurze Lebensdauer besessen haben. Er hätte sich in einen Überriesen verwandelt, ehe sein masseärmerer Partner überhaupt Zeit gehabt hätte, ein richtiger Stern zu werden. Wie hat der Begleiter diese Episode überlebt? Und hätte er nicht auf einer viel engeren Umlaufbahn landen müssen, als man dies heute beobachtet? Jetzt sind die Theoretiker gefordert, das Szenario zu erklären. www.mpg.de/19439207

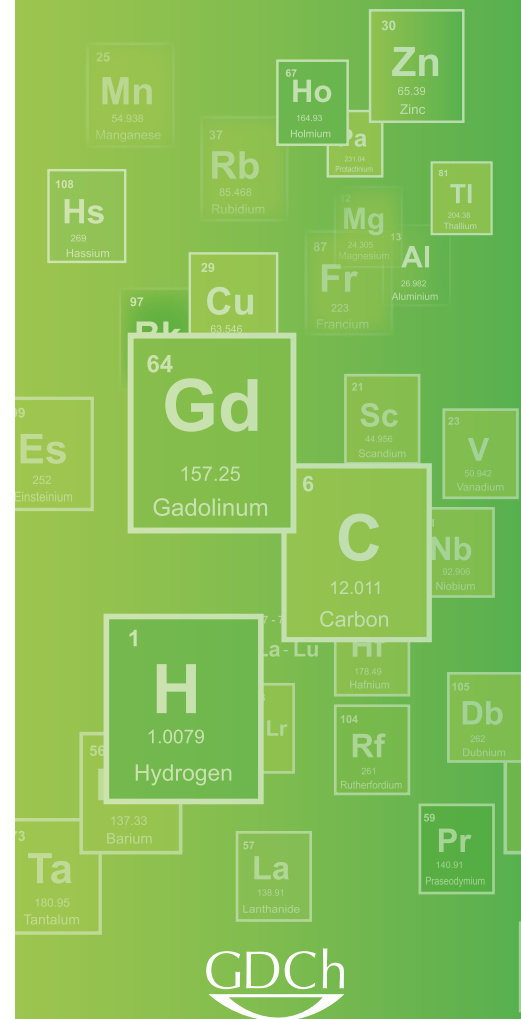
D A S
K A R R I E R E
P O R T A L

für Chemie und Life Sciences

Von Chemikern für Chemiker –
Nutzen Sie das Netzwerk
der GDCh:

- ➔ Stellenmarkt – Online und in den *Nachrichten aus der Chemie*
- ➔ CheMento – das Mentoring Programm der GDCh für chemische Nachwuchskräfte
- ➔ Publikationen rund um die Karriere
- ➔ Bewerbungsseminare und -workshops
- ➔ Jobbörsen und Vorträge

ANZEIGE

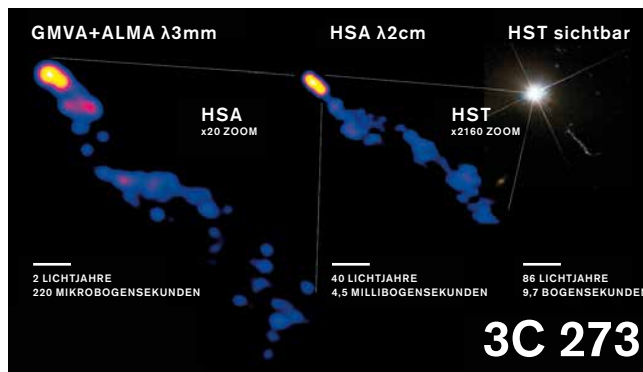


GDCh

GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER

www.gdch.de/karriere

Zoom ins Zentrum: Das linke Bild zeigt den bisher besten Blick auf den Plasmastrahl des Quasars 3C 273.



QUASAR IM FOKUS

Quasare sind die hellen Kerne von Galaxien, in denen jeweils ein supermassereiches schwarzes Loch sitzt. Die meisten dieser Massemonster stoßen sogenannte Jets aus, energiereiche Ströme, in denen Materie nahezu mit Lichtgeschwindigkeit ins All schießt. Eine Gruppe, der auch Forschende des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie angehören, haben nun den Quasar 3C 273 unter die Lupe genommen, der etwa 1,9 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt ist. Für ihre Beobachtungen nutzten die Astronominen und Astronomen ein weltumspannendes Netz von Radioteleskopen, die sie miteinander kombinierten. Diese Very Long Baseline Interferometry (VLBI) lieferte Bilder vom Ursprungsort des Jets nahe dem schwarzen Loch – dort, wo der Hunderttausende Lichtjahre lange Plasmastrom zu einem schmalen Strahl gebündelt wird. Der Blick in den Maschinenraum des Quasars zeigt, dass sich der Öffnungswinkel des Plasmastroms langsam verengt. Der Strahl verengt sich sogar außerhalb des Bereichs, in welchem die Schwerkraft des schwarzen Lochs dominiert. Dieses Verhalten wurde auch bei weniger aktiven schwarzen Löchern beobachtet. Jetzt stellen sich die Forschenden die Frage, warum die Bündelung der Jets in unterschiedlichen Systemen derart ähnlich verläuft.

www.mpg.de/19550449

TREIBER FÜR POPULISMUS UND POLARISIERUNG

Die einen halten digitale Medien für demokratiegefährdend, andere betonen die Chancen für mehr Partizipation. Ob und wie sich digitale Medien wirklich auf politische Verhaltensweisen auswirken, war das Thema einer Metastudie, an der das Max-Planck-Institut für Bildungsforschung beteiligt war. Dabei fanden die Forschenden positive wie negative Effekte: Einerseits fördern Onlinemedien die Möglichkeit politischer Teilhabe und die Mobilisierung von Wählerinnen und Wählern, was die demokratische Legitimation von Regierungen und Parlamenten stärkt. Sie können außerdem politisches Wissen vermitteln und für ein vielfältigeres Nachrichtenangebot sorgen. Andererseits kann besonders die Kommunikation unter Gleichgesinnten in sogenannten Echo-

kammern sozialer Netzwerke das Vertrauen in die Politik und in demokratische Institutionen beschädigen. Auch das Vertrauen in klassische Medien wie Zeitungen und Fernsehsender sinkt. Zusätzlich fördern digitale Medien Populismus und Polarisierung in der Bevölkerung. Allerdings unterscheiden sich die Auswirkungen von Land zu Land: Was in etablierten Demokratien potenziell destabilisierend wirkt, kann für aufstrebende Demokratien förderlich sein und in autoritären Regimen die Opposition stärken. Der positive Einfluss digitaler Medien ist in aufstrebenden Demokratien in Südamerika, Afrika und Asien am deutlichsten ausgeprägt. Die negativen Auswirkungen sind dagegen stärker in Europa und in den USA zu beobachten.

www.mpg.de/19474069

MUSIK MIT BEGRENZTEM COVIDRISIKO

Blasmusik stand lange im Verdacht, die Ansteckung mit Corona zu fördern. Tatsächlich können beim Klarinettespielen relativ viele Krankheitserreger wie Sars-CoV-2 freigesetzt werden – deutlich mehr als etwa beim Flötespielen. Ansonsten ist das Ansteckungsrisiko, das von einer infizierten Person an einem Blasinstrument ausgeht, jedoch deutlich geringer als das von singenden oder sprechenden Menschen –

wenn man sich jeweils gleich lange in ihrer Nähe aufhält. Zu diesem Schluss kommt eine umfassende Studie des Göttinger Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation und der Universitätsmedizin Göttingen. Die Forschenden haben den Partikelausstoß und das damit verbundene maximale Infektionsrisiko beim Spielen von zwanzig Blasinstrumenten bestimmt. Demnach bleiben vor allem

die besonders infektiösen größeren Atemtröpfchen in den Blasinstrumenten hängen. Trotzdem gelangt beim Musizieren mit Blasinstrumenten fünf bis fünfzigmal mehr Aerosol in die Umgebung als beim Atmen. Die Ergebnisse liefern Anhaltspunkte, wie Konzerte oder Proben auch während der Pandemie mit möglichst geringem Ansteckungsrisiko organisiert werden können.

www.mpg.de/19293534

FLUCHT VOR DER KNALLEREI

Viele Menschen freuen sich auf das Feuerwerk an Silvester, Vögel reagieren darauf jedoch mit Angst und Flucht.



FOTO: HELMUT KRUCKENBERG

Zwei Jahre lang herrschte in Deutschland an Neujahr weitgehend Stille. Dieses Jahr darf zum Jahreswechsel wieder fast überall geböllert werden. Dass nicht nur Menschen unter der immensen Lärm- und Schadstoffbelastung durch Feuerwerkskörper leiden, zeigt eine Studie des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie in Konstanz. Die Forschenden haben mehr als 300 Bläss-, Weißwangen-, Kurzschnabel- und Saatgänse in Deutschland, Dänemark und den Niederlanden mit GPS-Sendern ausgestattet und die Flugbewe-

gungen der Vögel acht Jahre lang in den Wochen vor und nach den Jahreswechseln erfasst. Die GPS-Daten zeigen, dass die Wildgänse ihre Schlafstellen in den Neujahrsnächten häufiger als sonst verlassen und manchmal bis zu 500 Kilometer weit fliegen. Diese Flucht hat ihren Preis: Um wieder zu Kräften zu kommen, müssen sich die Gänse mehrere Wochen länger ausruhen und mehr fressen. Für Vögel, denen es nicht gelingt, ihre Energiereserven wieder aufzufüllen, kann die Knallerei also tödlich enden.

www.mpg.de/19522040

Fruchtfliegen können die Netzhäute in ihren Augen mithilfe zweier Muskeln bewegen. So können sie Entfernungen besser einschätzen

17

BEWEGUNG IM AUGE

Die Augen von Insekten und anderen Gliedertieren sind fest mit dem Kopf verbunden. Forschende des Max-Planck-Instituts für biologische Intelligenz haben entdeckt, dass Fruchtfliegen Bewegungen trotz ihrer starren Augen folgen können, ohne den Kopf oder Körper drehen zu müssen. Sie verschieben lediglich die Netzhäute mit den Sehsinneszellen und verändern dadurch den Bildausschnitt, welcher auf der Netzhaut abgebildet wird. Die Forschenden stellten darüber hinaus fest, dass Fliegen mit weniger beweglichen Netzhäuten die Breite von Spalten im Untergrund schlechter abschätzen können. Die Bewegungen der Netzhäute scheinen folglich auch für das räumliche Sehen wichtig zu sein.

www.mpg.de/19400320

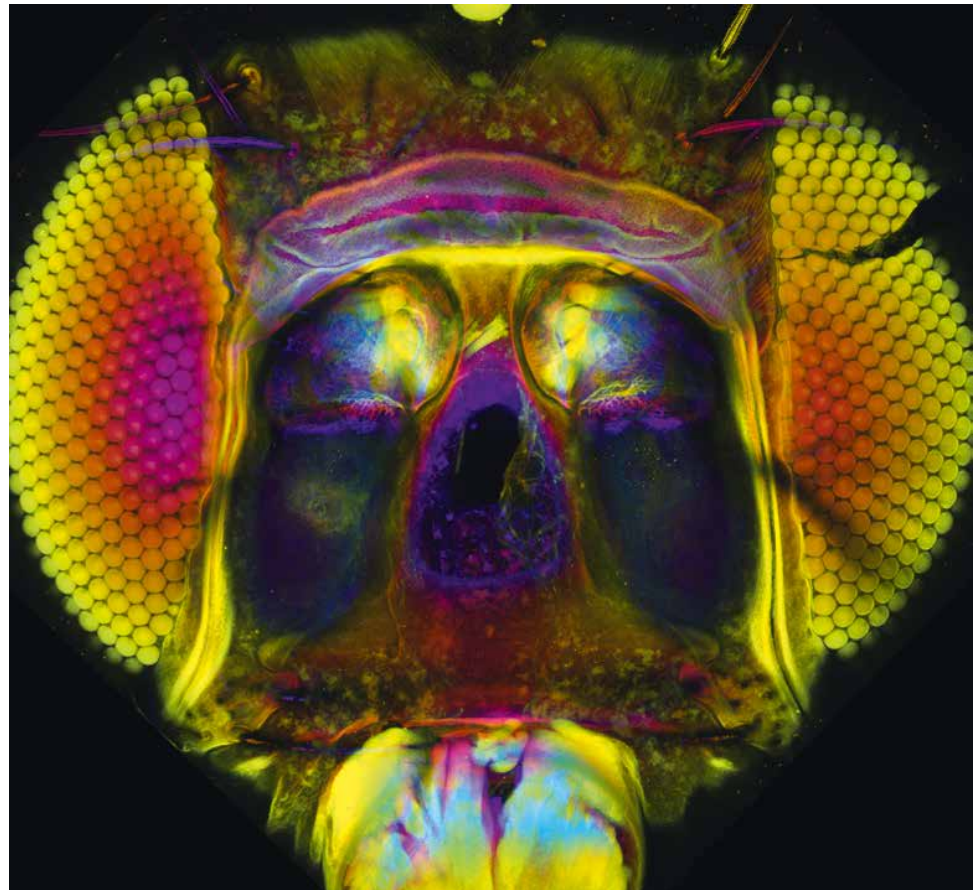


FOTO: MPI FÜR BIOLOGISCHE INTELLIGENZ (U.G./ANJA FRIEDRICH)

ZURÜCKHALTUNG ZAHLT SICH AUS

Alles wird teurer. Die Preise für Energie, Lebensmittel und vieles andere steigen deutlich. Seit Juni 2022 versucht die Europäische Zentralbank gegenzusteuern: Viermal hat sie schon an der Zinsschraube gedreht und kündigt weitere Leitzinserhöhungen an. Doch ist das die richtige Strategie? Der Politikwissenschaftler Martin Höpner warnt vor geldpolitischem Übereifer und empfiehlt, die Lohnentwicklung im Blick zu behalten.

18

Die Inflation schien verschwunden. Nicht Inflations-, sondern Deflationsdruck plagte die entwickelten Volkswirtschaften in den letzten beiden Dekaden. Wenig deutete darauf hin, dass sich das bald ändern würde. Innerhalb von gerade einmal anderthalb Jahren sind wir in einer anderen Welt angekommen. Zweistellige Anstiege der Verbraucherpreise, das gab es in Deutschland zuletzt während der Koreakrise im Jahr 1951 – und selbst da nur in zwei von vier Quartalen des Jahres.

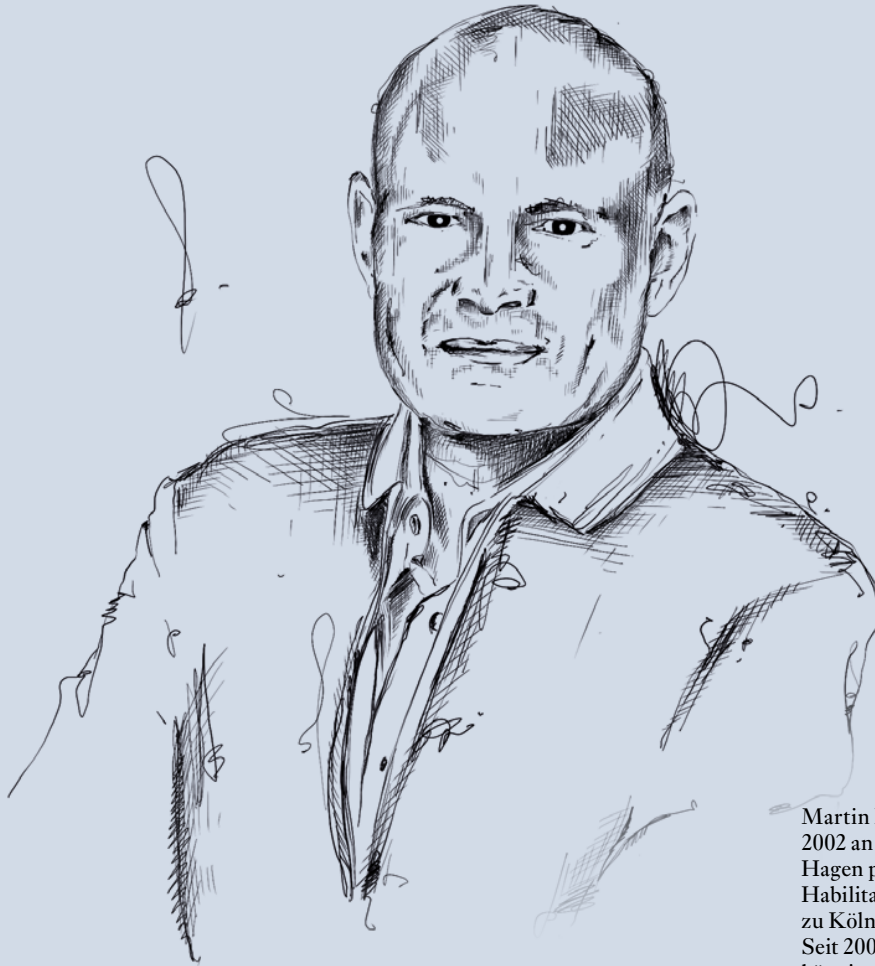
Bis zur Jahresmitte 2022 verzichtete die Europäische Zentralbank (EZB) darauf, den steigenden Preisen mit Zinserhöhungen entgegenzuwirken. Harsche Kritik daran kam besonders aus Deutschland, denn bereits in der zweiten Jahreshälfte 2021 hatte die Inflationsrate mit fünf Prozent deutlich über der Zielmarke von zwei Prozent gelegen. Die EZB reagierte also, wie auch die Notenbanker einräumen, ziemlich spät – dann aber energisch. Seit Juli 2022 hat sie den Zinssatz für Hauptrefinanzierungsgeschäfte, den wichtigsten Leitzins, viermal erhöht, und sie stellt weitere Zinsschritte in Aussicht. Nun, so meine ich, besteht die Gefahr, dass die EZB im Übereifer zu viel tut. Genauer gesagt: Mich irritiert, dass die europäische Notenbank ihre Ankündigungen nicht im Hinblick auf die Lohnpolitik konditioniert. Lassen Sie mich erklären, was ich damit meine.

→

ZUR SACHE

MARTIN HÖPNER

ILLUSTRATION: SOPHIE KETTERER FÜR MPG



Martin Höpner wurde im Jahr 2002 an der Fernuniversität Hagen promoviert. Die Habilitation an der Universität zu Köln folgte fünf Jahre später. Seit 2008 leitet er eine unabhängige Forschungsgruppe zur politischen Ökonomie der europäischen Integration am Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung in Köln, seit 2012 ist er zudem außerplanmäßiger Professor an der Universität zu Köln. Zu seinen Forschungsgebieten zählen die Heterogenität des europäischen Wirtschafts- und Währungsraums, die europäischen Binnenmarktfreiheiten und das exportorientierte deutsche Wirtschaftsmodell.

DIE GEWERK- SCHAFTEN HABEN BISHER SEHR STABILITÄTS- BEWUSST AUF DIE STEIGENDEN PREISE REAGIERT

Bisher sind die Ursachen der Inflation vor allem auf der Angebotsseite angesiedelt. Bereits während der Pandemie haben gestörte Lieferketten die Vorprodukte verteuert. Hinzu kamen deutliche Steigerungen der notorisch schwankenden Energiepreise. Waren diese im Jahr 2020 noch gefallen, zogen sie 2021 deutlich an. Wie wir heute wissen, war das nur der Anfang. Infolge des russischen Angriffs auf die Ukraine und der daraufhin verhängten Sanktionen sollten die Energiepreise, besonders die für Erdgas, förmlich explodieren. Das führt bis heute zu Preissteigerungen auf der ganzen Linie, weil Energie in allen Produkten und praktisch allen Dienstleistungen steckt. Alles, was man kaufen kann, wird teurer.

Etwas anderes sind Inflationen mit Zweitrundeneffekten, die man auch Lohn-Preis-Spiralen nennt. Damit werden Dynamiken bezeichnet, in denen sich Preise und Löhne gegenseitig hochschaukeln. Gewerkschaften wollen den Kaufkraftverlusten ihrer Mitglieder entgegenwirken und reagieren auf steigende Preise mit steigenden Lohnforderungen, harten Arbeitskämpfen und schließlich hohen Lohnabschlüssen. Damit erhöhen sie den Kostendruck auf die Unternehmen zusätzlich, die wiederum die Preise erhöhen müssen, was die Gewerkschaften erneut zu hohen Lohnforderungen ermuntert – und so fort. Selbst wenn die anfänglichen Ursachen der Preisschübe beseitigt sind, kann sich die Inflation auf diesem Wege verfestigen. Dass Notenbanken solche Spiralen mit deutlichen Zinserhöhungen stoppen müssen, ist unstrittig.

Entscheidend ist nun, dass wir solche Zweitrundeneffekte weder in Deutschland noch in der Eurozone insgesamt beobachten. Die Gewerkschaften haben bisher äußerst stabilitätsbewusst auf die steigenden Preise reagiert. Denken Sie etwa an den Tarifabschluss im Chemiesektor vom Oktober 2022 oder den im Metallbereich vom November. Das waren, stellt man die langen Laufzeiten der Tarifverträge in Rechnung, niedrige Abschlüsse (der ersten Tarifierhöhung im Metallbereich ist zudem eine achtmonatige Nullrunde vorgeschaltet). Die Gewerkschaften muten ihren Mitgliedern mit derartigen Lohnvereinbarungen viel zu. Lohn-Preis-Spiralen sind derzeit nicht zu erkennen. Ich würde noch weiter gehen: Das Ausmaß an stabilitätsorientierter Lohnpolitik, das wir derzeit in Deutschland und bisher auch in den anderen Eurozonenländern erleben, ist sensationell. Wir haben es nicht so erwartet. Meines Erachtens sollte die EZB darauf reagieren und ankündigen, ihre Leitzinsen weiter und durchaus auch deutlich zu erhöhen, wenn es Anzeichen für Zweitrundeneffekte gibt – aber eben nur dann. Besonders in Deutschland ermuntern Beobachter die EZB derzeit dazu, die Zinsen so oder so zu erhöhen. Das begründen sie mit der Notwendigkeit, die Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen zu dämpfen. Genau das bewirkt die vorsichtige Lohnpolitik aber ohnehin: Die Diskrepanz zwischen Inflation und Lohnerhöhungen senkt die Reallöhne und damit die Nachfrage.

Leider wird die Inflation auch ohne Zweitrundeneffekte nicht so schnell verschwinden. Das lässt sich an der Kluft zwischen den Anstiegen der Erzeugerpreise einerseits und der Verbraucherpreise andererseits ablesen. Die Erzeugerpreise, die die Herstellungskosten inklusive Vorprodukte erfassen, sind im Jahr 2022 nicht nur um rund zehn Prozent, sondern um dreißig bis vierzig Prozent gestiegen. Das bedeutet, dass noch viel Kostendruck in den Unternehmen schlummert, der erst nach und nach an die Verbraucher weitergegeben wird. Die Produktpreise dürften daher auch dann noch steigen, wenn die Erzeugerpreise schon wieder zu sinken beginnen. Daran ändern allerdings auch Zinserhöhungen nichts, im Gegenteil: Die dann erhöhten Finanzierungskosten kommen vielmehr auf den Kostendruck für die Unternehmen obendrauf.

Wenn die EZB sich ohne Beachtung der lohnpolitischen Reaktionen auf mittelfristig steigende Leitzinsen festlegt, könnte das die Gefahr von Zweitrundeneffekten sogar erhöhen. Dann geht von der Notenbankpolitik kein Disziplinierungseffekt aus. Die Gewerkschaften müssen stattdessen schlussfolgern: Es macht für die Höhe der Leitzinsen offenbar keinen Unterschied, wie wir auf die Preisschübe reagieren. Aber das ist noch nicht alles. Mit Zinserhöhungen verschlechtert die Notenbank die Refinanzierungsfähigkeit der Staaten, die es dann schwerer haben, ärmere

Haushalte zu entlasten. Ohne staatliche Entlastungen bleibt den Gewerkschaften nichts anderes übrig, als auf dem Wege der Lohnpolitik für Entlastungen zu sorgen – dann aber mit direkten Wirkungen auf den Kostendruck für die Unternehmen.

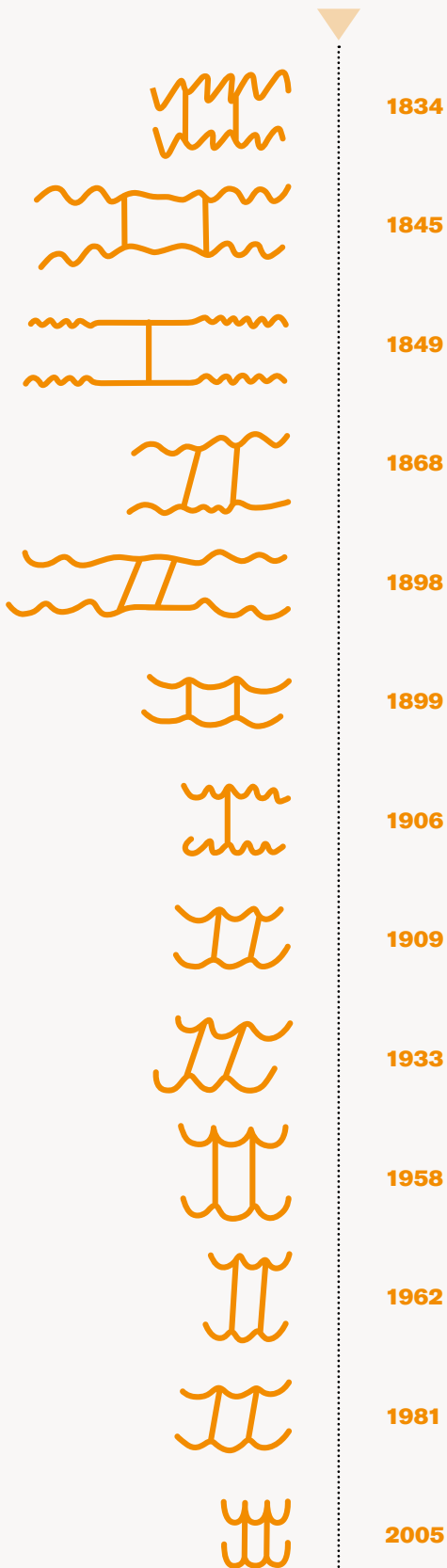
21

DIE INFLATION STELLT DIE EUROZONE AUF EINE ENORME BELASTUNGS- PROBE

Wie sich die Inflation mittelfristig entwickelt, hängt also von der Lohnpolitik ab. Das ist einer der Gründe, warum wir am Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung der Lohnpolitik besondere Aufmerksamkeit widmen. In naher Zukunft könnte sich ein Problem daraus ergeben, dass es in der Eurozone in Wahrheit nicht „die“ Lohnpolitik gibt – sondern neunzehn unterschiedliche mit unterschiedlichen Institutionen, Kräfteverhältnissen, Problemwahrnehmungen und Reaktionsmustern auf ökonomische Schocks. Auf einheitliche Reaktionen der Lohnpolitik kann die EZB stimmig reagieren – wenn auch zum Nachteil von Wachstum und Beschäftigung –, aber nicht auf neunzehn unterschiedliche. Bislang sehen wir auch in anderen Ländern der Eurozone kaum Anzeichen für Lohn-Preis-Spiralen. Wir wissen aber nicht, ob das so bleibt. Kommt es zu keinem Gleichklang der lohnpolitischen Reaktionen, könnten sich im Euroraum unterschiedliche Inflationsraten verstetigen, so wie bereits in den ersten zehn Eurojahren: Die Wettbewerbsfähigkeit der Länder mit höheren Inflationsraten verschlechterte sich, die Refinanzierbarkeit ihrer Staatsschulden ging in den Keller. Genau so entstand die Eurokrise. Die Inflation stellt die Eurozone daher auf eine enorme Belastungsprobe. Der Euro ist noch lange nicht über den Berg.



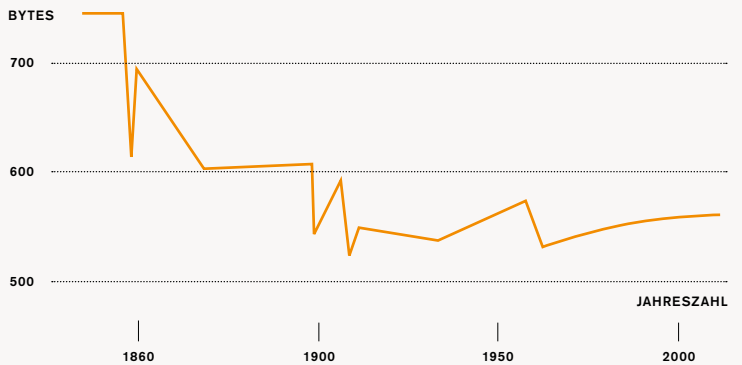
**DIE ENTWICKLUNG DES ZEICHENS <GA>
IN DER VAI-SCHRIFT**



DIE VAI-SCHRIFT

Die Silbenschrift mit rund 200 Graphemen (Schriftelementen) wurde ab den 1830er-Jahren von Analphabeten in Liberia entwickelt. Dank zahlreicher Dokumente ist die Schriftentwicklung von den Anfängen bis zur Standardisierung als Unicode im Jahr 2005 gut dokumentiert. Ein internationales Forschungsteam unter Beteiligung von Olivier Morin, Forschungsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Geoanthropologie, hat die Veränderungen der Zeichen mit mathematischen Modellen analysiert. Daraus lässt sich folgern, dass die einzelnen Schriftelemente tatsächlich, wie bereits seit Längerem vermutet, mit der Zeit einfacher werden.

VERÄNDERUNG DER KOMPLEXITÄT DES ZEICHENS <GA>



Die deskriptive Komplexität, die sich an der Größe der Bilddatei im Zipformat bemisst, hat über die Zeit deutlich abgenommen

IM FOKUS

DRAHT ZUR WELT

24 | Hört sich anders an

30 | Licht geht ins Ohr

36 | Nager mit innerem Kompass

24

Musikalische Vielfalt: Fidel Canchi Cuata aus dem indigenen Volk der Chimane spielt eine Art Geige. Lokale Musikinstrumente zu dokumentieren, war Teil der Studien des Wissenschaftlers Nori Jacoby in Bolivien.



FOTO: EDUARDO A. UNDURRAGA

HÖRT SICH ANDERS AN

TEXT: NORA LESSING

25

Trommeln und Gesang, Rhythmus und Klang – Musik berührt und verbindet. Doch was genau wir wahrnehmen, wenn uns ein Lied entgegenschallt, wissen die meisten von uns kaum zu sagen. Zufriedengeben kann sich Nori Jacoby mit dieser Situation nicht: Am Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik in Frankfurt am Main untersucht der Kognitionsforscher mit seinem Team unter anderem, wie Menschen weltweit Rhythmen und Tonhöhen wahrnehmen. Dabei generieren die Forschenden nicht nur Erkenntnisse über Musik.



Singen für die Forschung: Die Probandin aus dem Volk der Chimane hört Intervalle über Kopfhörer und singt das Gehörte nach. Der Kognitionsforscher Nori Jacoby (rechts) steuert per Laptop Aufzeichnung und Wiedergabe, ein lokaler Übersetzer steht zur Unterstützung bereit.

Von den Chimane, die am Amazonas leben, hört Nori Jacoby erstmals 2016 als Postdoc am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Hier, in der Forschungsgruppe von Josh McDermott, wollen er und seine Mitstreitenden herausfinden, wie Menschen aus Klängen Informationen gewinnen. „Eines Tages sprach mich Josh an“, erinnert sich Jacoby. „Er sagte: Ich reise mit dem Kulturanthropologen Ricardo Godoy ins Amazonasgebiet, um mit den Chimane zu arbeiten. Du interessierst dich für Musik, du reist gerne – hast du Lust mitzukommen?“

Binnen weniger Wochen tauscht der junge Wissenschaftler so den Straßenlärm und die urbane Geschäftigkeit Bostons gegen die Feuchtigkeit und das schrille Zirpen des Amazonasregenwalds ein. Hier, im Nordosten Boliviens, lebt das indigene Volk der Chimane in kleinen, dörflichen Gemeinschaften, jagt und fischt, baut Maniok und Bananen an. Handys oder Zugang zum Internet haben die meisten hier nicht. Die Forschenden führen ihre Experimente in den Dorfgemeinschaften durch, in denen die Chimane leben. Mit der Hilfe von Übersetzern verständigt sich Nori Jacoby mit seinen Gastgebern, bittet diese, Rhythmen für ihn nachzuklopfen und Töne nachzusingen. „In Bezug auf das Soziale war es nicht groß anders, als Testreihen in New York oder Boston durchzuführen“, erinnert sich der

Forscher. „Aber in Hinblick auf die auditive Wahrnehmung war sofort klar: Diese Menschen machen vollkommen andere Erfahrungen als Testpersonen, die in der westlichen Welt sozialisiert worden sind.“

Ohne Worte verstehen, was im Kopf passiert

Ein paar Jahre zuvor hatte Nori Jacoby, der mehrere Instrumente spielt und auch für längere Zeit als Komponist gearbeitet hat, schon einmal etwas Ähnliches erlebt. Da war er in Indien unterwegs, auf einer Konzertreise, und arbeitete mit einem indischen Tontechniker zusammen. „Dieser Mann hatte einen völlig anderen Zugang zu Klängen und Musik als ich. Die Art und Weise, wie er mit Klängen umging, war für mich absolut rätselhaft, das konnte ich einfach nicht nachvollziehen.“ Diese Erfahrung habe sich eingebrennt und sei am Amazonas bei den Chimane wieder hochgekommen. „Ich fragte mich: Ist es woanders genauso? Hören Menschen überall auf der Welt die gleichen Klänge, nehmen diese aber ganz unterschiedlich wahr?“ Um Antworten zu finden, reiste der Wissenschaftler für Studien unter anderem nach Mali und Uruguay, begann Kooperationen mit Forschenden auf der ganzen

Welt aufzubauen. Seit 2018 leitet er eine Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik in Frankfurt am Main. Eines der Ziele: die menschliche Wahrnehmung von Musik systematisch und kulturübergreifend zu erforschen.

Konkret treibt Nori Jacoby um, welche Ideen Menschen von musikalischen Elementen haben – von Rhythmen, Tonhöhen, Intervallen. Er untersucht, wie unterschiedliche Gehirne solche musikalischen Elemente repräsentieren. „Was ich mit meinen Experimenten aus den Köpfen der Menschen herausholen will, sind die mentalen Repräsentationen der Bausteine, aus denen Musik besteht“, erläutert der Wissenschaftler. Interessant zu untersuchen ist das auch deshalb, weil die musikalische Welt im Kopf keineswegs eine exakte Kopie der musikalischen Welt „da draußen“ ist: Über welche mentalen Repräsentationen ein Mensch verfügt, was er wahrnehmen und wiedergeben kann, das hängt mit seinen Vorerfahrungen zusammen. Zudem sind solche Repräsentationen nicht statisch, sondern verändern sich mit jeder neuen auditiven Erfahrung. Eine knifflige Situation für Forschende, die noch durch den Umstand verschärft wird, dass die meisten Menschen keine Sprache für das haben, was sie beim Hören wahrnehmen. „Die Frage, die ich mir unablässig stelle, lautet also: Wie kann ich ohne direkten Zugang zum Gehirn und möglichst ohne Worte verstehen, was im Kopf passiert, wenn jemand etwas hört? Wie schaffe ich es, Gedanken zu lesen?“

Die Antwort, die der Forscher gefunden hat, ist überaus kreativ: Er macht sich die menschliche Fähigkeit zur Imitation zunutze. „Wie reagieren Menschen weltweit auf Musik? Sie beginnen mitzusingen, stampfen den Rhythmus, bewegen sich dazu“, sagt Jacoby. „Dazu braucht es keine Worte – nur den Klang. Also haben wir Probandinnen und Probanden gebeten, sich Dinge anzuhören und das Gehörte zu imitieren.“ In einem Experiment spielte der Forscher Testpersonen computergenerierte Rhythmen vor, die nachgeklopft werden sollten. Was die Testpersonen nicht ahnten: Sie spielten gerade eine Variante von „Stille Post“ – und zwar mit sich selbst. Bei „Stille Post“ flüstert eine Person einer anderen ein kompliziertes Wort zu. Diese gibt das Verstandene flüsternd einer dritten Person weiter. Zuletzt wird das Wort, das sich im Laufe des Spiels immer mehr verändert, laut ausgesprochen. Analog dazu hörten Versuchspersonen einen Rhythmus, den sie nachklopfen sollten. Danach wurde ihnen erneut ein Rhythmus vorgespielt – eine gemittelte Audiokopie dessen, was sie zuvor selbst geklopft hatten. Über mehrere Runden klopften die Versuchspersonen so immer wieder ihre eigenen Rhythmen nach, die sich dabei stetig ein wenig veränderten. Was genau hofften Nori Jacoby und sein Team, auf diese Weise herauszufinden?

Die Erwartung bestimmt die Wahrnehmung

27

„Das Interessante an ‚Stille Post‘ ist, dass man mit einem obskuren Wort startet, das Spiel am Ende aber meistens mit einem banalen Wort endet“, erklärt der Wissenschaftler. „Menschen geben also regelhaft nicht das Wort weiter, das sie tatsächlich gehört haben, sondern ein Wort, von dem sie glauben, es gehört zu haben.“ Mithilfe von Experimenten, die nach diesem Schema konzipiert sind, können Forschende also etwas über die Hörerwartungen von Menschen lernen, genauer: herausfinden, welche Wörter Testpersonen so vertraut sind, dass sie mit ihnen rechnen – und auf welche Wörter das eher nicht zutrifft. Genau diesen Mechanismus machten sich Nori Jacoby und sein Team zunutze, um etwas über die Rhythmuserwartungen der Versuchspersonen herauszubekommen. Sie spielten ihnen einen computergenerierten, „obskuren“ Startrhythmus vor und bekamen „banale“ Zielrhythmen zurück: Entsprechungen der mentalen Repräsentationen der Teilnehmenden.

„Es ist tatsächlich wie Magie: Wir spielen einen zufälligen, computergenerierten Rhythmus vor, und ohne dass sie uns explizit etwas dazu sagen müssen, nähert sich das, was die Leute imitierend klopfen, nach und nach ihren musikalischen Wahrnehmungskategorien an“, freut sich Nori Jacoby. Unzählige Male und in mittlerer

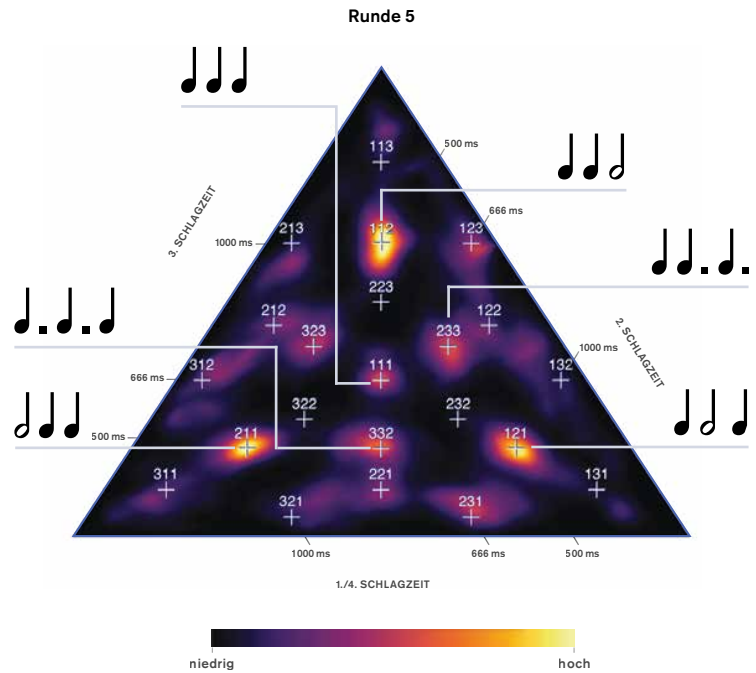
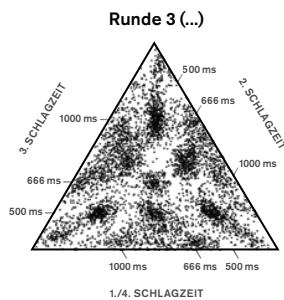
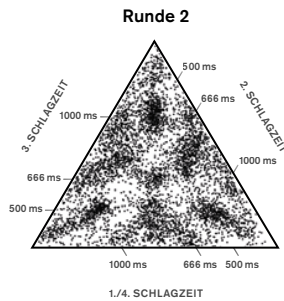
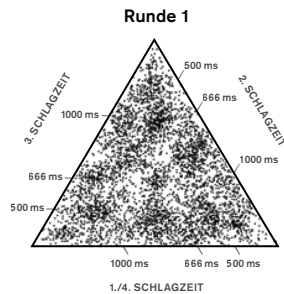
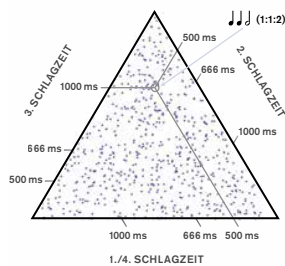
→



Entlegener Forschungsort: Das Dorf Emeya liegt am Ufer des Maniqui-Flusses mitten im bolivianischen Regenwald. Wer dort hinwill, fährt drei Tage lang mit einem motorisierten Kanu flussaufwärts.

Zufallsgenerierter Dreier-Rhythmus

Nachgeklopfter Dreier-Rhythmus



Darstellung, in welchem Maß die nachgeklopften Rhythmen zwischen verschiedenen Testpersonen übereinstimmen

Testpersonen aus den USA bekamen die Aufgabe, einen zufallsgenerierten Dreier-Rhythmus nachzuklopfen. Die Forschenden erfassten dabei genau die Zeitpunkte der Schläge (Schlagzeiten). Das Ergebnis wurde aufgezeichnet und den Teilnehmenden erneut als Muster vorgespielt. Die meisten von ihnen fielen im Laufe der fünf Runden in einen vertrauten Rhythmus, wie die Cluster in den Schwarz-Weiß-Grafiken und die Auswertung in der Heatmap zeigen.

28

weile fünfzehn Ländern haben er und seine Mitstreitenden das Experiment wiederholt – in Korea etwa, in Uruguay und in den Vereinigten Staaten. Heatmap-Darstellungen der kumulierten Ergebnisse machen deutlich: Was die Menschen da klopfen, ist hochgradig geordnet und folgt klaren Prinzipien. „Als wir die Verteilungen zum ersten Mal sahen, waren wir tief beeindruckt: Die mentalen, musikalischen Repräsentationen von Menschen mit demselben kulturellen Hintergrund gleichen sich aufs Haar. Viele der Versuchspersonen können nichts über die Rhythmen sagen, die sie da klopfen – und doch sitzen diese in ihren Köpfen und bestimmen, was diese Menschen wahrnehmen, wenn sie etwas hören, und was sie dann entsprechend im Experiment wiedergeben.“

Nicht zwangsläufig ließ sich dabei vom Wohnort und der Muttersprache der Teilnehmenden auf die Rhythmen schließen, die sie klopfen würden. „Unter unseren Versuchspersonen waren zum Beispiel viele Studierende. Und obwohl diese aus so unterschiedlichen Ländern wie Korea und den USA kamen und sehr unterschied-

liche Sprachen sprachen, klopfen sie in unserem Experiment am Ende häufig ganz ähnliche Rhythmen.“ Woran genau das liegt, können die Forschenden nicht sicher sagen. Sie vermuten jedoch, dass ähnliche Hörgewohnheiten auf ähnliche Erfahrungen schließen lassen – dass Studierende weltweit also ähnlichen Einflüssen ausgesetzt sind und vielfach wohl auch ähnliche Musik hören. Im Kontrast zu den recht gleichförmigen Ergebnissen der Studierenden waren die Rhythmen, die Bewohnerinnen und Bewohner von Großstädten wie Bamako in Mali oder La Paz in Bolivien klopfen, enorm vielfältig. „Unsere Analysen lassen vermuten, dass unter anderem sozioökonomische Faktoren und die Art der Bildung, die ein Mensch durchlaufen hat, Einfluss darauf haben, welche Rhythmen er oder sie klopf.“

Die Studie zeigt: Ob am Amazonas, in Seoul oder auf der Hochebene von La Paz – Menschen auf der ganzen Welt haben ein Rhythmusempfinden. Welche Rhythmen sie jedoch konkret wahrnehmen, ist unterschiedlich. So kann selbst der musikalisch umfassend gebil-

dete Nori Jacoby keine rhythmische Struktur heraus hören, wo Schlagzeuger aus Mali unmittelbar den Grundrhythmus des örtlichen Tanzes Maraka ausmachen – 2, 3, 7 Schläge. Und das, so berichtet der Forscher, ist nur eines von zahlreichen Beispielen, die die Experimente zutage gefördert haben und die den großen Reichtum an Hörgewohnheiten und musikalischen Traditionen auf der Welt erahnen lassen. Dass Rhythmen so unterschiedlich gehört werden, legt die Vermutung nahe, dass die Musikwahrnehmung entscheidend von kulturellen Prägungen abhängt. Zugleich zeichnen sich Rhythmen und andere musikalische Elemente oft durch einfache mathematische Beziehungen aus. Spricht das nicht im Gegenzug dafür, dass die Musikwahrnehmung auf einer allgemeineren Ebene universell ist, dass in ihr eine Art mathematisches Gespür zum Ausdruck kommt?

Oktaven klingen nicht für alle gleich

„Tatsächlich ist das westliche Denken tief geprägt von dieser Idee, die auf Pythagoras zurückgeht“, kommentiert Nori Jacoby. Diesem seien mathematische Beziehungen als grundlegend für die Welt und somit auch für die Musikwahrnehmung erschienen. „Viele physikalische Phänomene zeichnen sich in der Tat dadurch aus, dass sie sich durch einfache mathematische Beziehungen beschreiben lassen – schwingende Saiten etwa. Die Annahme ist weit verbreitet, dass auch die Funktionsweise des menschlichen Geistes pythagoreische Ideen widerspiegelt.“ Ein prominentes Beispiel für ein physikalisches Phänomen, das ganzzahlige Verhältnisse mit einem oft als harmonisch empfundenen

Klang verbindet, ist die Oktave. Viele Menschen in der westlichen Welt beschreiben das Intervall als gleich klingend – sie hören die beiden Töne so, als ob derselbe Ton zweimal angeschlagen würde, nur einmal mit einer tieferen und einmal mit einer höheren Frequenz. Dies spiegelt sich in unserem Notationssystem wider, das für Noten, die eine Oktave auseinanderliegen, die gleichen Buchstaben verwendet – zum Beispiel g und g'. Physikalisch zeichnet sich die Oktave dabei dadurch aus, dass die höhere Note genau doppelt so schnell schwingt wie die tiefere. Ein weiteres Phänomen, das die Ideen des Pythagoras zu bestätigen scheint: Mit jedem angeschlagenen Ton schwingen die ganzzahligen Vielfachen seiner Frequenz mit, was die Obertonreihe ergibt. Wird die menschliche Klangwahrnehmung bei aller rhythmischen und klanglichen Vielfalt am Ende also von ganzzahligen, ma-

thematischen Verhältnissen bestimmt? „Wenn hier tatsächlich ein biologischer Mechanismus am Werk wäre, müsste dieser sich überall auf der Welt nachweisen lassen“, kommentiert Nori Jacoby.

Um zu testen, ob das der Fall ist, entwarf der Forscher ein weiteres Experiment, das auf Nachahmung beruht. Er spielte Versuchspersonen vom Volk der Chimane und aus den USA zwei hohe Töne außerhalb ihres Gesangsbereichs vor und bat sie, das Gehörte nachzusingen. „Die Teilnehmenden ahmten den Abstand zwischen den beiden Tönen sehr genau nach“, erinnert sich der Forscher. In Hinblick auf die Frequenz der nachgesungenen Töne zeigten sich jedoch beträchtliche Unterschiede: „Wenn wir das Experiment mit Musikerinnen und Musikern aus der westlichen Welt durchführen, dann singen sie uns dieselben Töne drei oder vier Oktaven tiefer vor – ein Ausdruck der Oktavenäquivalenz.“ Menschen aus den USA, die nicht Musik machen, taten das jedoch nur in etwa der Hälfte der Fälle. Und im Amazonasgebiet war von der Oktavenäquivalenz nichts mehr zu merken. „Auch die Chimane sangen das Intervall zwischen den beiden Tönen sehr genau nach. Auf welcher Höhe der Tonleiter sie die Töne im Verhältnis zum Klangbeispiel platzierten, war unabhängig vom ursprünglichen Beispiel“, erzählt Nori Jacoby. In einem Folgeexperiment konnte er zeigen, dass auch in der Wahrnehmung der Chimane zwei Töne im Oktavverhältnis klanglich gut miteinander verschmelzen. „Das bedeutet für diese Testpersonen aber nicht, dass die beiden Töne äquivalent sind. Sie bewerten das Phänomen anders als Musikerinnen und Musiker aus der westlichen Welt.“

Mit seiner Forschung will Nori Jacoby der Klangwahrnehmung auf die Spur kommen. Doch seine Ergebnisse sagen nicht nur etwas über unser Hörerleben aus. Vielmehr wird hier die menschliche Wahrnehmung im Allgemeinen untersucht, zeigt sich empirisch als Produkt eines Interpretationsprozesses, den unser Gehirn immer wieder neu auf Basis bisheriger Erfahrungen und aktueller Sinneseindrücke vornimmt. „Was das Ganze noch spannender macht, ist, dass diese Prozesse simultan in uns allen ablaufen und ungeheuer dynamisch sind: Im größeren Maßstab ist das die Basis der Kulturentwicklung“, zeigt sich Nori Jacoby überzeugt. Für Menschen, die die Tradition hochhalten, ist das vielleicht nicht die allerbeste Nachricht. „Selbst wenn ich mich als traditionellen Musiker begreife und immer wieder dasselbe Stück spiele: Mein Gehirn und somit meine Wahrnehmung dieses Stückes verändern sich stetig“, sagt der Kognitionsforscher. So habe man etwa den frühen Bebop zu der Zeit, in der er aufkam, als sehr innovativ wahrgenommen und Elvis Presleys Rock 'n' Roll als Skandal empfunden. „Heute finden viele Bebop und Rock altmodisch. Das zeigt: Unsere Wahrnehmung ist immer im Fluss – und mit ihr unsere Kultur.“

www.mpg.de/podcasts/sinne

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Anders als oft behauptet ist Musik keine universelle Sprache – das zeigen Studien mit Menschen in unterschiedlichen Ländern.

Wie eine Person musikalische Elemente, etwa Rhythmen oder Intervalle, wahrnimmt, ist unter anderem von ihrer Kultur und ihren Hörgewohnheiten geprägt.

Die Verarbeitung von Musik im Gehirn wird von jeder neuen Erfahrung beeinflusst und ändert sich auf diese Weise ständig.

Die elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt, warum die Cochlea auch als Hörschnecke bezeichnet wird. In ihren Windungen sitzen die Hörsinneszellen (orange; infolge des Präparationsverfahrens für diese Aufnahme sind die Membranen, welche die Cochlea-Gänge umgeben, teilweise zerrissen).

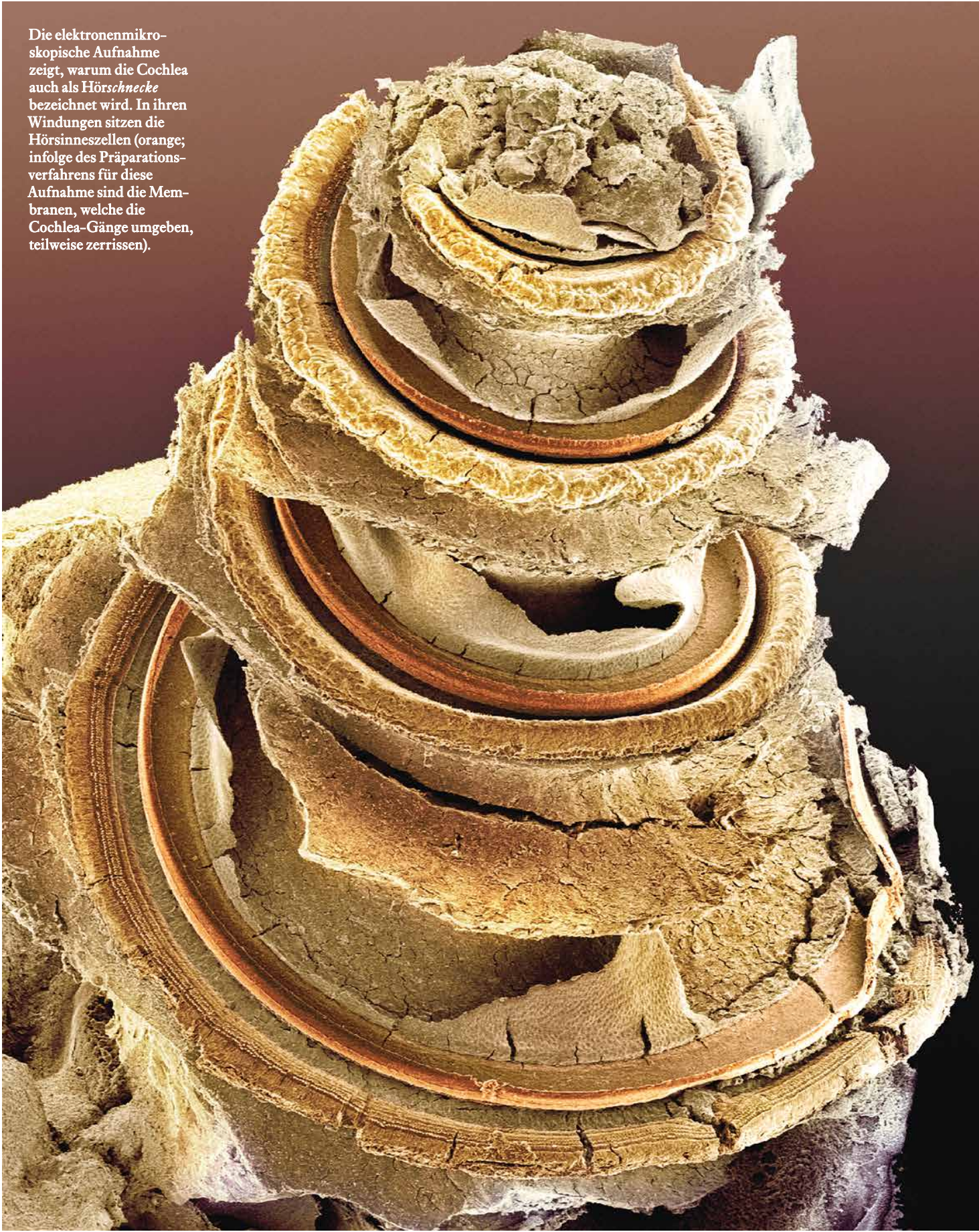


BILD: SCIENCE PHOTO LIBRARY / FURNESS, DR. DAVID

LICHT GEHT INS OHR

*TEXT:
CATARINA PIETSCHMANN*

Im Freundeskreis diskutieren, ein Konzert genießen, bei Straßenlärm telefonieren – Menschen mit Hörproblemen bleiben alltägliche Höreindrücke oft verwehrt. Tobias Moser will den Betroffenen mit einer neuen Generation von Hörhilfen neue Klangwelten zugänglich machen. Die sogenannten optischen Cochlea-Implantate sind ein Beispiel für Therapien, die auf Erkenntnissen aus der Grundlagenforschung beruhen.

In Deutschland leben rund 16 Millionen schwerhörige und 80000 gehörlose Menschen. Etwa zwei von tausend Kindern werden mit einer bislang noch unheilbaren Hörstörung geboren, weitere werden in den ersten Lebensjahren schwerhörig. Wer von Geburt an wenig oder nichts hört, lernt nur mit Mühe oder überhaupt nicht sprechen und kann sich schlechter mit seinen Mitmenschen austauschen. Weniger soziale Kontakte sind die Folge.

Tobias Moser, Neurowissenschaftler und Hals-Nasen-Ohren-Arzt, leitet eine Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften in Göttingen und das Institut für Auditorische Neurowissenschaften der Universitätsmedizin Göttingen. Er ist Spezialist für die sogenannte Synapsen-Schwerhörigkeit, also für Hörstörungen im Innenohr, bei denen ein Hörgerät in der Regel wirkungslos ist. Wird bei einem Säugling eine solche Synapsen-Schwerhörigkeit festgestellt, kann ihm derzeit nur ein sogenanntes Cochlea-Implantat späteres Hören und Sprechen ermöglichen. Im Idealfall wird das Implantat im ersten Lebensjahr eingesetzt, noch bevor das Kind zu sprechen beginnt. „In den ersten Lebensjahren werden im Gehirn viele synaptische Verbindungen aus- und umgebaut“, erläutert Moser. „Wenn während dieser Phase im Gehirn zu wenige Hörreize aus den Ohren ankommen, werden viele Verbindungen nicht korrekt geknüpft. Später lässt sich dies kaum mehr kompensieren.“

Hören ist kompliziert: Schallwellen werden von der Ohrmuschel in den äußeren Gehörgang bis zum Trommelfell geleitet, wo sie von den Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel des Mittelohrs aufgenommen und an das Innenohr weitergegeben werden – an die wie eine Spirale aufgewickelte Hörschnecke. „Bis hier können Störungen oft chirurgisch so gut behandelt werden, dass man noch nicht einmal ein Hörgerät braucht“, sagt Moser. Die Ursache von Schwerhörigkeit liegt jedoch in 70 Prozent aller Fälle im Innenohr oder am Hörnerv.

Übertragung ans Innenohr

Die spiralförmige Hörschnecke des Innenohrs – auch Cochlea genannt – trägt vier Reihen von Haarsinneszellen, die mit ihren Haarbündeln in den flüssigkeitsgefüllten Innenraum der Cochlea ragen. Von den Gehörknöchelchen auf die Cochlea übertragene mechanische Schwingungen versetzen das Sinnesgewebe in Bewegung. Dies verbiegt die Haarbündel der Sinneszellen um winzigste Bruchteile von Millimetern. Das reicht aus, um die Haarsinneszellen zu aktivieren. Die äußeren drei Reihen der Haarsinneszellen verstärken diese mechanischen Schwingungen bei leisen Tönen. Die innere Reihe überträgt die Schallinformation von ihren Synapsen an die Zellen des Hörnervs, welche die

Information als Nervenimpuls ans Gehirn leiten. Jeder Mensch wird mit einer bestimmten Anzahl von Haarsinnes- und Hörnervenzellen geboren. Diese müssen ein Leben lang halten, denn es bilden sich keine nach. „Wahrscheinlich lassen Lärm und Alter zunächst die Haar-, dann auch die Hörnervenzellen absterben“, erklärt Moser. Wird eine Haarsinneszelle beispielsweise in einer Diskothek mit 100 Dezibel oder mehr beschallt, geht sie in der Regel zugrunde. Auch manche Antibiotika oder Krebsmedikamente können vorübergehende oder bleibende Hörschäden verursachen.

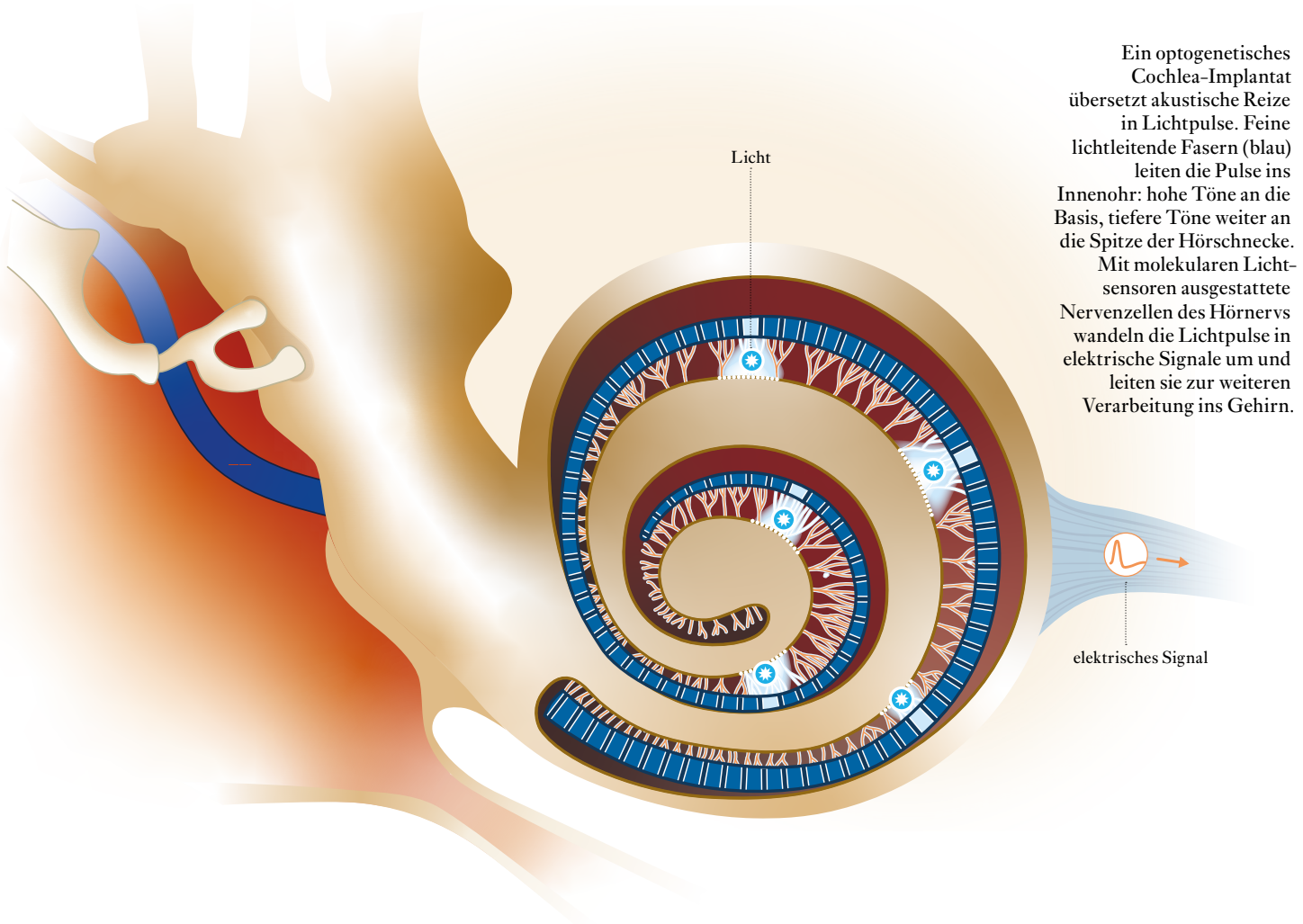
Cochlea-Implantate werden nicht nur taub geborenen Kindern, sondern zunehmend auch schwersthörigen Erwachsenen eingesetzt. Die Implantate übernehmen die Funktion der Hörschnecke und umgehen die Sinneszellen. Sie reizen die Nervenzellen des Hörnervs also direkt. Bei der Implantation werden ein Elektrodenträger mit – je nach Modell – 12 bis 24 Elektroden in die Hörschnecke geschoben und ein elektrischer Stimulator nebst Empfangsspule und Magnetkopplung hinter der Ohrmuschel im Schädelknochen platziert. Ein daran gekoppelter Sprachprozessor zerlegt Schall in seine Frequenzen und überträgt die Frequenz-, Zeit- und Lautstärkeinformation an den Stimulator. Nach dem Einsetzen elektrischer Cochlea-Implantate müssen die Patientinnen und Patienten das Hören wieder neu lernen, denn die geringe Anzahl an Elektroden schränkt die Wahrnehmung unterschiedlicher Tonhöhen stark ein. „Am Anfang sprechen viele Patienten von einem rauschigen und metallischen Klang. Sprache ist häufig schwer oder gar nicht zu verstehen“, beschreibt Moser die ersten Eindrücke nach einer Operation. „Es hört sich zum Beispiel an, wie wenn jemand hinter einer Wand spricht: Man hört, dass jemand etwas sagt, kann es aber nicht verstehen. Auch nach Monaten der Übung ist oft schwer zu erkennen, ob eine Frage gestellt oder eine Aussage gemacht wird, weil die Patienten die Sprachmelodie nicht erfassen können.“

Vor der Operation gibt es deshalb stets intensive Gespräche zwischen Patienten und Angehörigen sowie den Ärztinnen, Ingenieuren und Logopädinnen. „Wenn sich jemand nicht vorstellen kann, über ein Jahr intensiv zu üben, sollte er auf ein Implantat verzichten“, sagt Moser. Aber selbst nach intensivem Hörtraining wird es nicht wieder so sein wie früher. „Die Betroffenen werden immer Schwierigkeiten haben, Sprache in Alltagssituationen mit Hintergrundgeräuschen oder mit mehreren Gesprächspartnern zu verstehen. Auch Melodien lassen sich nur schwer erkennen.“ Vom Klang-

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Hörstörungen im Innenohr sind durch ein Cochlea-Implantat teils zu korrigieren. Forschende entwickeln zurzeit optogenetische Implantate, die einen besseren Höreindruck erzeugen sollen als heute eingesetzte elektrische Implantate.

Eine neue Generation optischer Cochlea-Implantate kann mehr Frequenzen übertragen und verspricht einen besseren Höreindruck. Die erste Studie am Menschen soll 2026 starten.



Ein optogenetisches Cochlea-Implantat übersetzt akustische Reize in Lichtpulse. Feine lichtleitende Fasern (blau) leiten die Pulse ins Innenohr: hohe Töne an die Basis, tiefere Töne weiter an die Spitze der Hörschnecke. Mit molekularen Lichtsensoren ausgestattete Nervenzellen des Hörnervs wandeln die Lichtpulse in elektrische Signale um und leiten sie zur weiteren Verarbeitung ins Gehirn.

erlebnis eines Klavierkonzerts von Sergei Rachmaninow oder eines Whitney-Houston-Songs bleibt nach dem Einsetzen eines Cochlea-Implantats also nicht mehr viel übrig.

In seiner Sprechstunde in der Universitätsmedizin Göttingen spricht Tobias Moser immer wieder mit Patientinnen und Patienten, die mit dem „elektrischen Hören“ nicht zufrieden sind. Besonders Berufsmusiker zweifeln an der Situation. Die Hoffnung des Wissenschaftlers ruht deshalb auf sogenannten optischen Cochlea-Implantaten, an denen Mosers Team seit 2007 forscht. Die Idee: Die Schallinformation wird nicht elektrisch, sondern durch Licht übertragen. Wenn es funktioniert, wäre das ein Meilenstein. Der Klang von Sprache und Musik könnte dadurch sehr viel natürlicher und nuancenreicher werden.

Den Grundstein dieser Technik haben Forschende in den 1970er-Jahren am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried gelegt. Dieter Oesterhelt und sein Team haben damals in der Zellmembran von Bakterien Ionenpumpen entdeckt, die von Licht aktiviert werden. Um die Jahrtausendwende fanden Peter Hege-

mann von der Universität Regensburg (heute: Humboldt-Universität zu Berlin) gemeinsam mit Georg Nagel (jetzt: Universität Würzburg) und Ernst Bamberg am Max-Planck-Institut für Biophysik in Frankfurt lichtempfindliche Ionenkanäle in Grünalgen. Diese Kanäle bilden die Basis für das neue Forschungsfeld der Optogenetik, das Wissenschaftlern dabei hilft, die Funktionsweise von Zellen und Organen zu entschlüsseln. Insbesondere die Neurowissenschaften nutzen die Optogenetik. Nervenzellen sind ja außerhalb des Auges lichtunempfindlich. Damit man sie mit Licht aktivieren kann, müssen die Zellen also erst einmal mit einem entsprechenden Sensor ausgestattet werden. Dazu dienen die ursprünglich aus Algen stammenden, lichtempfindlichen Ionenkanäle. Zunächst bringen die Forschenden den genetischen Bauplan dieser Proteine mittels Gentherapie in die Nervenzellen des Hörnervs ein. Als Genfähre dienen harmlose, vermehrungsunfähige Viren, welche ausschließlich an die Nervenzellen im Hörnerv binden und das Gen für das Kanalprotein im Zellkern der Nervenzelle platzieren. Die Nervenzellen bauen den Lichtsensor dann in ihre Membran ein. Sobald er Licht erhält, öffnet er seine Schleusen, Ionen strömen

ein, und die Zelle wird elektrisch aktiv. Wie beim herkömmlichen elektrischen Cochlea-Implantat wird der Schall in Frequenzbänder zerlegt, nun aber in viel mehr und feinere: 64 den Frequenzbändern zugeordnete Lichtleiter leiten Licht ins Innenohr – hohe Frequenzen an die Basis der Cochlea, niedrige immer weiter die Windungen der Schnecke entlang bis zu deren Spitze. „Das Gehirn weiß, dass aktive Nervenzellen an der Basis der Cochlea hohe Töne bedeuten, aktive Zellen am Ende für ein tiefes Brummen stehen. Wir müssen also nur dafür sorgen, dass die Lichtleiter zu den richtigen Stellen an der Cochlea führen und die zum Ton passenden Nervenzellen aktivieren“, erklärt Moser. Die Implantate vermitteln so selbst dann einen Höreindruck, wenn keine Sinneszellen mehr intakt sind.

Tonhöhen lassen sich gut unterscheiden

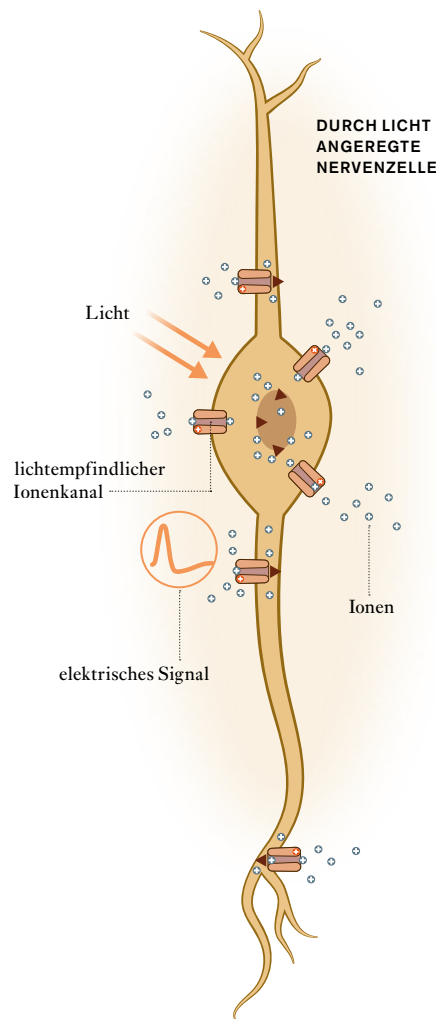
Erste Tests mit Computersimulationen und Nagetieren zeigen, dass die Technik funktioniert. Für schwache und mittlere Lautstärken ist die Unterscheidung von Tonhöhen vom normalen Hören kaum zu unterscheiden. Mosers Team will die neuen Implantate nun am Göttinger Primatenzentrum an Weißbüschelaffen testen. Die Tiere sind echte Plaudertaschen und in dieser Hinsicht dem Menschen sehr ähnlich. Die Forschenden machen sich das zunutze, indem sie den Affen aus einem Lautsprecher derzeit Rufe vorspielen, die nur so viele Frequenzen besitzen wie ein optisches Cochlea-Implantat. „Die Tiere erkennen die Rufe trotz der wenigen Frequenzen und antworten darauf. Das lässt darauf schließen, dass die neuen Implantate auch unsere Sprache verständlich transportieren könnten“, so Moser. Als Nächstes wollen die Forschenden um den Göttinger Nachwuchswissenschaftler Marcus Jeschke den Affen optische Cochlea-Implantate einsetzen und herausfinden, ob sie die Rufe ihrer Artgenossen dann immer noch erkennen.

Bevor 2026 die erste klinische Studie am Menschen beginnen kann, müssen Moser und sein Team noch an der Technik feilen. Der Energieverbrauch der Implantate darf nicht zu hoch sein, und die Zeit- und Frequenzauflösung sollen optimiert werden. Einen wird der Start der Studie besonders freuen, auch wenn er selbst nicht daran teilnehmen kann: Fadhel El May ist Doktorand bei Tobias Moser. Von Geburt an schwerhörig, trug er als Kind zunächst klassische Hörgeräte. Im Alter von sechzehn Jahren bekam er dann ein elektrisches Cochlea-Implantat in ein Ohr.

Wie hat sich sein Leben durch dieses Implantat verändert? „Anfangs war ich erschrocken, wie wenig ich verstand. Es dauerte sechs Monate, bis mein Gehirn es geschafft hat, Sprache zu verstehen. Wenn ich heute

das Implantat ausschalte, hab ich keine Chance mehr, dem Gespräch einer Gruppe zu folgen“, erzählt El May, der in Lausanne und Boston Ingenieurwesen studiert hat. Obwohl er inzwischen auch Diskussionen in größeren Runden folgen kann, sind ihm Eins-zu-eins-Gespräche lieber. „Es ist anstrengend für mich, wenn mehrere Menschen durcheinanderreden. Da steige ich dann manchmal einfach aus.“

Ein Cochlea-Implantat für das andere Ohr möchte er nicht. „Mit dem Hörgerät in diesem Ohr höre ich zwar schlechter als mit Implantat, dafür kann ich den reichen Klang und die hohen Frequenzen beim Musikhören genießen. Das will ich nicht missen!“ Inzwischen hat El May mit Klavierunterricht angefangen. Einziges Manko: Akkorde kann er schlecht korrigieren, weil er den Unterschied zum Einzelton nicht hört. Trotz aller Abstriche – einen zumindest kleinen Vorteil hat ein Cochlea-Implantat gegenüber dem natürlichen Hören dann doch: El May kann es als Kopfhörer benutzen. Das Implantat verbindet sich via Bluetooth automatisch mit dem Smartphone. So kann er ohne Störgeräusche telefonieren, denn den „Earpod“ hat er ja schon im Ohr. www.mpg.de/podcasts/sinne



Damit eine Zelle des Hörnervs Lichtpulse wahrnehmen und die darin steckende Information über einen Höreindruck weitergeben kann, wird sie gentechnisch so verändert, dass sie lichtempfindliche Ionenkanäle produziert und in ihre Zellmembran einbaut. Die Kanäle lassen elektrisch geladene Atome hindurchströmen, wenn sie belichtet werden. Die einfließenden Ionen führen zur Bildung eines elektrischen Signals, das die Nervenzelle ins Gehirn weiterleitet.

FORSCHUNG LEICHT GEMACHT

Das Magazin der Max-Planck-Gesellschaft als **ePaper**:

www.mpg.de/mpf-mobil

www.mpg.de/mpforschung

KOSTENLOS
DOWNLOADEN!



Unübersehbar ein Nagetier:
Ansell's Graumull (*Fukomys anelli*) ist eine von etwa einem Dutzend Graumull-Arten. Mit seinen mächtigen, ständig nachwachsenden Schneidezähnen reißt das Tier die Erde beim Graben seiner Tunnel los und tritt sie mit den Vorder- und Hinterbeinen nach hinten.



NAGER MIT INNEREM KOMPASS

TEXT: ANDREAS LORENZ-MEYER

FOTO: CHRISTOF SEELBACH FÜR MPG

37

Magnetfelder riechen und schmecken nach nichts, sie sind unsichtbar, und sie machen auch keine Geräusche: Für sie fehlt uns Menschen also der Sinn. Der Graumull hingegen besitzt einen Magnetsinn, mit dem er sich in der Dunkelheit zurechtfindet. Wie der unterirdisch lebende Nager Magnetfelder wahrnimmt, das untersuchen Pascal Malkemper und sein Team am Max-Planck-Institut für Neurobiologie des Verhaltens – caesar in Bonn.

Kaum geht im Raum mit den Graumullen das Licht an, beginnt es zu rascheln. Hier und da taucht aus den Tunneln und Kammern in den Käfigen ein länglicher Körper mit hellbraunem Fell auf und verschwindet wieder. Plötzlich Klopfzeichen: „Das sind Warnsignale“, flüstert Pascal Malkemper. „Sehen Sie hier, dieses Tier in der Röhre! Es führt mit seinem Körper wellenförmige Bewegungen aus und erzeugt so Vibrationen.“ Die Nachricht bleibt nicht unbeantwortet: Ein Artgenosse erscheint am anderen Ende der Röhre und antwortet mit Klopfen.

Der Raum für die Graumulle ist voller Käfige, von denen immer zwei durch Plexiglasröhren miteinander verbunden sind. Die Temperatur beträgt 26 Grad, die Luftfeuchtigkeit liegt bei über 60 Prozent. Das entspricht den Verhältnissen unter der Erde in Sambia. Die Art kommt nirgends sonst auf der Welt vor. Auch die Käfige berücksichtigen die Ansprüche der Nager an ihren Lebensraum. Die Röhren imitieren die Tunnelgänge, in denen die in Familienverbänden lebenden Tiere ihr Leben lang unterwegs sind. Die Käfige bieten eine Latrinen-, eine Schlaf- und eine Futterkammer. Zu fressen gibt es Kartoffel- oder Karottenstücke, manchmal auch Äpfel. Wasserspender braucht es hingegen nicht: Graumulle trinken nicht, sondern nehmen alle Flüssigkeit über die Nahrung auf.

38

In der Natur bewohnen sie unterirdische, teilweise mehrere Kilometer lange Tunnelsysteme. Die Tiere leben also in permanenter Dunkelheit. Und doch kommen sie in diesem Gewirr aus schmalen Gängen bestens zurecht. Mit traumwandlerischer Sicherheit steuern sie die verschiedenen Kammern an – so kennen sie die Lage der Futterkammer, in der sie Wurzeln und Knollen bunkern, ganz genau.

Augen, Nasen und Ohren helfen den Graumullen in ihrem unterirdischen Gangsystem bei der Orientierung nur bedingt weiter. Um ihr Ziel zu finden, nutzen die Tiere einen besonderen Sinn: den Magnetsinn. Seit einiger Zeit weiß man, dass die Tiere das Magnetfeld der Erde wahrnehmen können. Einzigartig sind sie im Tierreich damit nicht. Fische, Schildkröten, Amphibien und Fledermäuse besitzen diese Fähigkeit ebenfalls. Auch Zugvögel orientieren sich am Erdmagnetfeld. Ihr Magnetsinn ist gut erforscht, er sitzt wahrscheinlich im Auge.

Vögel besitzen einen sogenannten Inklinationskompass, das heißt, sie nehmen ausschließlich den Neigungswinkel wahr, in dem die Magnetfeldlinien auf die Erdoberfläche treffen. Am Äquator ist dieser Winkel gleich null, je weiter ein Vogel nach Norden oder Süden fliegt, desto größer wird dieser Winkel. Vögel können folglich nicht zwischen magnetischem Süd- und Nordpol unterscheiden, sie fliegen entweder Richtung Pole oder Äquator. Über den Magnetsinn bei Säugetie-

ren ist bisher nur wenig bekannt, aber der Mechanismus scheint sich fundamental von jenem der Vögel zu unterscheiden. Graumulle besitzen einen Polaritätskompass, der sich wie eine Kompassnadel an den beiden magnetischen Polen der Erde ausrichtet. Während der Magnetkompass der Vögel ohne Licht aussetzt, funktioniert jener der Graumulle auch in völliger Dunkelheit.

Die Graumulle hat sich Pascal Malkemper ausgesucht, weil sie die einzigen bekannten Nagetiere sind, die sich am Erdmagnetfeld orientieren. Ob ihre Verwandten, die Nacktmulle, die in manchen Labors gehalten werden, Magnetfelder ebenfalls wahrnehmen können, ist dagegen noch unklar. Zudem ist die Haltung der Graumulle etwas einfacher als die der Nacktmulle, weil sie dank ihres Fells die Körpertemperatur besser halten können und ihre Kolonien aus zwei bis zwölf Individuen deutlich kleiner sind als jene der Nacktmulle, die aus bis zu 300 Tieren bestehen.

„Der Magnetsinn scheint eine untergeordnete Stellung in der Hierarchie der Sinne einzunehmen.“

PASCAL MALKEMPER

Optischer Längsschnitt durch das Graumullgehirn. In der Großhirnrinde sind die Forschenden auf Nervenzellen gestoßen (Pfeile), welche an der Verarbeitung von Informationen aus dem Magnetsinn beteiligt sind.

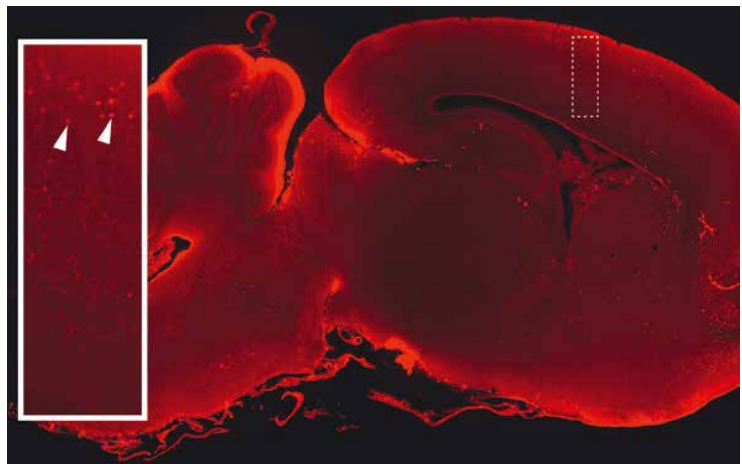


BILD: PASCAL MALKEMPER / MPI FÜR NEUROBIOLOGIE DES VERHALTENS



Pascal Malkemper untersucht das Orientierungsvermögen der Graumulle in einem Labyrinth. Das Gangsystem befindet sich in einem künstlichen Magnetfeld, welches die Tiere zur Orientierung nutzen.

39

Pascal Malkemper öffnet eine schwere Stahltür und betritt einen kleinen Raum. Darin auf einem Tisch ein Labyrinth, dessen Gänge die Forschenden mit Klappen öffnen und schließen können. Der Raum ist ausgefüllt mit einem Konstrukt aus Stangen und Streben, welches den Tisch umgibt. „In diesem Spulensystem sind viele Kilometer Kupferdraht aufgewickelt. Fließt Strom durch diese Drähte, entsteht ein Magnetfeld im Inneren der Spule, das wir genau kontrollieren können. Auf diese Weise können wir künstliche Magnetfelder jeglicher Art erzeugen“, erklärt Malkemper.

Virtual Reality für Graumulle

Während der Versuche kompensieren die Forschenden das echte Erdmagnetfeld mit den Magnetspulen und simulieren gleichzeitig ein neues Erdmagnetfeld. Zusätzlich schirmen schwarze Vorhänge das Miniaturlabyrinth ab und verhindern so, dass sich die Tiere während eines Experiments an visuellen Reizen im

Raum orientieren können. Auch gegenüber Geräuschen und Vibrationen ist das Labyrinth abgeschottet, die Nager sollen durch nichts abgelenkt werden. Da selbst Gerüche stören, wird die Kammer nach jedem Durchlauf penibel geputzt. „Eine reizarme Umgebung also, bis auf das künstliche Magnetfeld. So stellen wir sicher, dass unsere Messwerte ausschließlich auf den Magnetsinn der Tiere zurückzuführen sind“, erklärt Malkemper.

Graumulle nutzen wie die meisten Tiere immer alle ihre Sinne. Wenn sie etwas hören oder riechen, orientieren sie sich häufig lieber daran als an den magnetischen Signalen. „Der Magnetsinn scheint generell eher eine untergeordnete Stellung in der Hierarchie der Sinne einzunehmen. Ein Grund dafür könnte sein, dass das Signal-Rausch-Verhältnis aufgrund der geringen Intensität des Erdmagnetfeldes gering ist.“

Dass die Graumulle ihren Magnetsinn zur Orientierung nutzen, konnte Malkempers Team mit einem einfachen





FOTO: CHRISTOF SEELBACH FÜR MPG

Gut aufgestellt: die Forschungsgruppe, bestehend aus Runita Shirdhankar, Alessia Atzori, Pascal Malkemper, Georgina Fenton, Li Zhang und Sybille Wolf-Kümmeth.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die Forschenden möchten verstehen, wo und wie magnetische Informationen im Gehirn des Graumulls verarbeitet werden.

Erste Befunde deuten darauf hin, dass die Sinneszellen für den Magnetsinn in den Augen liegen.

Experiment im Labyrinth zeigen. Tiere, die einmal gelernt haben, im Labyrinth eine Kammer mit Futter zu lokalisieren, brauchen sehr viel länger, um den Weg zum Futter zu finden, wenn das künstliche Magnetfeld um das Labyrinth verändert und damit ihre Orientierung durcheinandergbracht wird. Aber nicht nur die Richtung des Erdmagnetfeldes könnte den Graumullen in der Natur als Orientierungshilfe dienen. Eine noch offene Frage ist, welche Rolle lokale magnetische Anomalien spielen,

die in der Natur etwa durch Eisenerze hervorgehoben werden. Sie könnten den Tieren als magnetische Landmarken dienen. In der Magnetfeldkammer am Max-Planck-Institut in Bonn lassen sich auch solche magnetischen Anomalien erzeugen. „Wir wollen testen, ob derartige Anomalien den Tieren das Navigieren im Labyrinth erleichtern. So wie Markierungen oder Schilder an den Wänden eines Labyrinths einem Menschen bei der Orientierung helfen würden. Dafür können wir das Magnetfeld in Echtzeit verändern, abhängig von der Position des Tieres im Labyrinth – sozusagen Virtual Reality für Graumulle“, sagt Malkemper.

Pascal Malkemper und sein Team wollen herausfinden, wie die Graumulle das Magnetfeld wahrnehmen und welche Gehirnregionen die Signale verarbeiten. Dazu messen die Forschenden die Aktivität von Nervenzellen in einer Gehirnregion, die als Hippocampus bekannt ist und große Bedeutung für die räumliche Orientierung hat. Hier werden Informationen vom Kurz- ins Langzeitgedächtnis überführt – der Hippocampus ist also sozusagen der Arbeitsspeicher des Gehirns.

Die Doktorandin Runita Shirdhankar sucht im Hippocampus nach sogenannten Ortsgedächtniszellen und analysiert sie. Jede dieser auch *place cells* genannten Nervenzellen ist an einer bestimmten Stelle im Labyrinth aktiv. „Die Frage ist, ob die Zellen an einem an-

deren Punkt aktiv werden, wenn wir lediglich das Magnetfeld ändern. Dann wüssten wir, dass die Ortsgedächtniszellen Informationen von einem anderen Zelltyp im Gehirn erhalten, der die Richtung des Magnetfeldes verarbeitet. Nach diesen Zellen suchen wir“, erklärt Malkemper. Bei der Suche nach diesen Zellen in anderen Gehirnregionen helfen Malkemper und seinem Team Proteine, die immer dann gebildet werden, wenn eine Nervenzelle aktiv ist. Um diese sichtbar zu machen, markieren die Forschenden sie mit fluoreszierenden Farbstoffen und machen das Gehirn anschließend durchsichtig. Unter dem Mikroskop verraten sich durch das Magnetfeld aktivierte Nervenzellen dann durch ihr Leuchten. „Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass mehrere Regionen an der Verarbeitung des Magnetsinns beteiligt sind, unter anderem der Hippocampus und der vordere Teil der Vierhügelplatte im Mittelhirn. Dort werden bei anderen Säugern die Informationen verschiedener Sinne integriert“, sagt Malkemper.

Zellen mit Eisenpartikeln

Von diesen Arealen ausgehend, wollen Malkemper und sein Team die Sinneszellen – also das eigentliche Kompassorgan – finden, mit denen die Graumulle ein Magnetfeld wahrnehmen können. Gesucht sind Zellen, die winzige magnetische Eisenpartikel enthalten. Diese Magnetnadeln aus Eisenoxid sind jedoch nur wenige millionstel Millimeter groß. Statt sie direkt zu suchen, wollen sich die Forschenden daher von den Gehirnarealen zu den Sinneszellen leiten lassen. Farbstoffe markieren die Nervenzellen und ihre Fortsätze. An diesen Fortsätzen wollen sich die Forschenden von Nervenzelle zu Nervenzelle entlanghangeln, bis hin zum Ursprung des Magnetsignals: den Sinneszellen. Einen ersten Hinweis auf den Sitz des Magnetsinns hat das Team bereits: Durch die vorübergehende Betäubung der Augen lässt sich auch der Magnetsinn abschalten. „Die Augen müssen also in irgendeiner Form an der Wahrnehmung von Magnetfeldern beteiligt sein“, sagt Pascal Malkemper.

Sind die Sinneszellen für die Magnetinformationen erst einmal gefunden, wollen die Forschenden ihre Funktionsweise untersuchen und die Gene identifizieren, die die Wahrnehmung von Magnetfeldern ermöglichen. Diese würden den Forschenden auch verraten, wie sich der Magnetsinn bei Säugetieren entwickelt hat. Darüber ließe sich besser abschätzen, ob und wie sich die elektromagnetischen Felder in der modernen, vom Menschen geprägten Natur auf Tiere auswirken. Und schließlich könnten die Graumulle in Malkempers Labor Antworten auf die Frage liefern: Haben auch Primaten, zu denen ja wir Menschen gehören, einen unbewussten Magnetsinn?

„Die Augen sind wahrscheinlich an der Wahrnehmung von Magnetfeldern beteiligt.“

PASCAL MALKEMPER

www.mpg.de/podcasts/sinne

Als Grundschüler lernte Krishna Gummadi, neben der Schule, Musikinstrumente zu spielen und zu programmieren. Die Musik gab er bald auf, das Programmieren wurde seine Berufung. Heute erforscht er als Direktor am Saarbrücker Max-Planck-Institut für Softwaresysteme unter anderem, warum künstliche Intelligenz oftmals genauso diskriminierende Entscheidungen trifft wie Menschen und wie sich das verhindern lässt.

TEXT: TIM SCHRÖDER

Als Anfang der 1990er-Jahre die ersten Algorithmen auf den Markt kamen, die an die Intelligenz des Menschen heranreichten, war die Begeisterung groß. In Banken übernahmen sie die zeitraubende Aufgabe, die Handschrift auf Schecks zu entziffern. Andere Algorithmen erkannten erstmals Gegenstände auf Bildern – Fußbälle auf dem Rasen zum Beispiel. Computer waren damit nicht mehr nur ausführende Organe, mathematische Roboter, die wie der Schachcomputer einfach in Sekundenschnelle Tausende von Varianten durchspielen. Jetzt konnten sie sogar Dinge erkennen und interpretieren. Inzwischen nehmen Algorithmen dem Menschen längst viele Entscheidungen ab, und oft genug ist das umstritten: Algorithmen filtern aus Bewerbungen die besten Kandidaten für eine Stelle heraus. Andere erspüren die Vorlieben von Internetkäufern, um gezielt Werbung zu schalten. Damit greift die künstliche Intelligenz (KI) tiefer denn je in unseren Alltag, in unsere Gesellschaft ein. „Die künstliche Intelligenz hat soziotechnische Systeme hervorgebracht, die einen ganz erheblichen Einfluss auf unser Zusammenleben haben“, sagt Krishna Gummadi. „Mich interessiert, welche Probleme das mit sich bringt und wie man diese lösen kann.“

Krishna Gummadi ist Direktor am Max-Planck-Institut für Softwaresysteme in Saarbrücken. Er hat sich lange Zeit mit verteilten Rechnernetzen, dem Cloud-Computing oder dem sicheren Datenverkehr im Internet beschäftigt. Seit einiger Zeit interessiert ihn vor allem die Verschmelzung von Gesellschaft und Technik. Er nennt das Social Computing. Immer häufiger wird – auch in der Öffentlichkeit und den Medien – diskutiert, inwieweit die Entscheidungen der „soziotechnischen Systeme“ ungerecht sind und Menschen benachteiligen können. Krishna Gummadi geht diesen Algorithmen auf den Grund.

Bekannt wurde vor wenigen Jahren die KI-Software Compas (Correctional Offender Management Profiling for Alternative Sanctions) aus den USA, die das Rückfallrisiko von Straftätern verlässlich berechnen sollte. Für die Risikobewertung nutzte die Software nicht nur Angaben über die Schwere der Straftat und über Vorstrafen, sondern auch persönliche Daten wie das Alter. Und obwohl die Softwaredesigner dies bestritten, griff das Programm auch auf das Vorstrafenregister naher Verwandter zu sowie auf Informationen über Alkohol- oder Drogenmissbrauch in der Familie, soziale Bindungen, Freunde oder die finanzielle Situation. Auch verarbeitete die Software Charaktermerkmale wie die Tendenz zu Wut und Aggression. In vielen Bundesstaaten fällten Gerichte auf Basis schlechter Compas-Bewertungen besonders harte Urteile. Experten des Recherchenetzwerks ProPublica untersuchten die Compas-Ergebnisse genauer – und veröffentlichten schließlich eine Studie, die Schlagzeilen machte. Sie zeigte, dass die Compas-Algorithmen farbigen Angeklagten ein höheres Risiko attestierten, erneut straffällig zu werden, als dies tatsächlich der Fall ist. Bei wei-

—>

BESUCH BEI

KRISHNA
GUMMADI

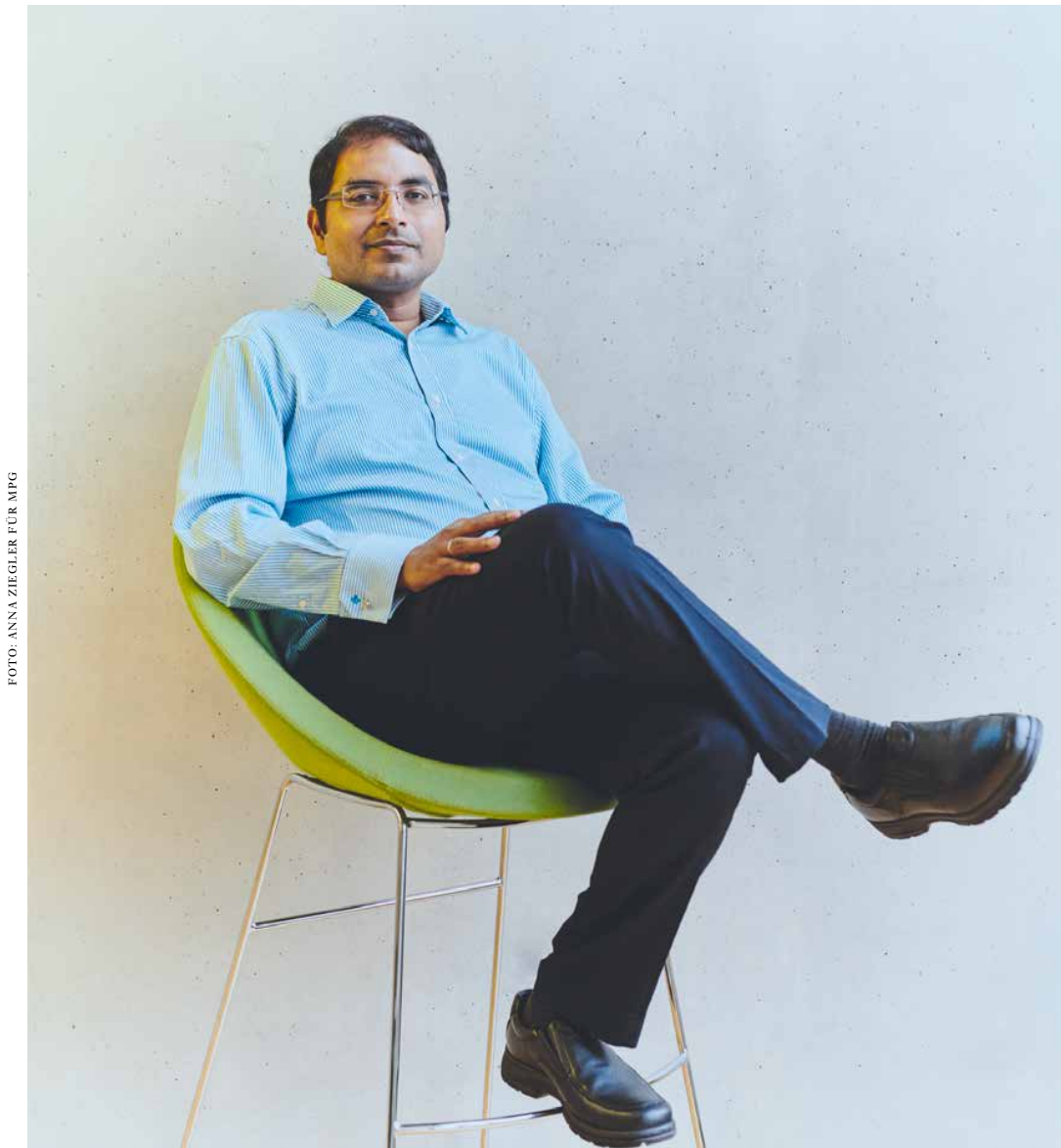


FOTO: ANNA ZIEGLER FÜR MPG

Grenzgänger: Krishna Gummadi forscht an der Schnittstelle von Informatik und Sozialwissenschaften. Er untersucht etwa die gesellschaftlichen Auswirkungen künstlicher Intelligenz.



FOTO: ANNA ZIEGLER FÜR MPG

44

Auf Fairness programmiert:
Manchmal treffen künstliche neuronale Netze diskriminierende Entscheidungen. Krishna Gummedi erweitert die Algorithmen, um das künftig zu verhindern.

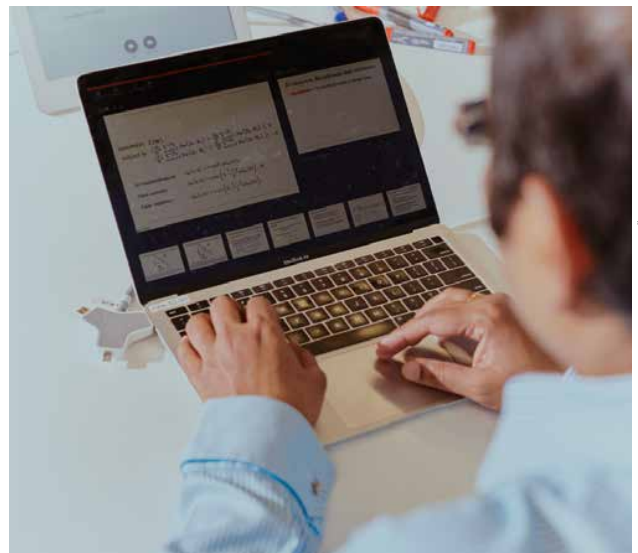


FOTO: ANNA ZIEGLER FÜR MPG

Ben Angeklagten war es umgekehrt: Compas gab häufiger zu positive Prognosen. KI-Algorithmen wie die von Compas basieren auf Verfahren des maschinellen Lernens.

Sie werden stets mit Daten aus der Realität gefüttert und trainiert, um dann selbstständig Entscheidungen zu treffen. Diese Entscheidungen sind aber nur so gut und richtig wie die Daten, mit denen man die Algorithmen trainiert. Ein bekanntes Beispiel ist ein Algorithmus, der gelernt hat, auf Bildern Fußbälle zu erkennen. Eine Analyse der Software zeigte, dass der Algorithmus die Fußbälle an den Kriterien „schwarz-weiss“, „sechseckig“ und „grün“ identifizierte, weil auf vielen Fotos Rasen zu sehen war – eine Korrelation, die mit den Eigenschaften von Fußballen nichts zu tun hat. Der Fußball-Algorithmus taugt für eine Anekdote. Der Compas-Algorithmus aber hatte schlimme Folgen, weil er farbige Menschen diskriminierte. Letztlich war Compas mit Daten trainiert worden, die Menschen erhoben hatten – und ganz offensichtlich waren diese Daten so tendenziös, dass sie Farbige benachteiligten. „Wir nennen so etwas einen Bias, eine Verzerrung der Daten“, sagt Krishna Gummadi. „Im Grunde hatten es die Entwickler von Compas ja gut gemeint. Sie wollten die Risikoeinschätzung objektiver gestalten, indem sie den Computer die Arbeit machen ließen.“ Menschen können voreingenommen sein. Der Computer ist es nicht, so dachte man.

Ähnlich war es vor einigen Jahren bei einer US-Software, die aus vielen Bewerbungen automatisch die geeigneten Personen herausfiltern sollte. Es zeigte sich, dass sie Frauen deutlich seltener als geeignet vorschlug. „Wir wollen verstehen, wie die Algorithmen arbeiten, damit solche Schwächen ausgegült werden“, sagt Krishna Gummadi. Auf die Frage, ob er sich mit Benachteiligung beschäftigt, weil er vielleicht selbst schon einmal Opfer von Diskriminierung war, schüttelt er den Kopf. „Nein, ich interessiere mich einfach für viele verschiedene Themen – die Verbindung von gesellschaftlichen Aspekten und Informatik macht mir großen Spaß.“ Krishna Gummadi lächelt, während er von seiner Arbeit erzählt. „Ich arbeite wirklich gern, und tatsächlich habe ich ansonsten nicht allzu viele Hobbys.“

Krishna Gummadi ist in der indischen Großstadt Hyderabad aufgewachsen. Seinem Vater war es wichtig, dass die beiden Söhne eine gute Ausbildung bekommen. Er selbst war der Erste in der Familie gewesen, der studierte; er hatte seinen Bachelor als Ingenieur gemacht. Mehr war damals nicht drin – nach dem Bachelor musste er Geld verdienen. Krishna und sein Bruder sollten es im Leben weiterbringen. „Unsere Eltern haben sich darum gekümmert, dass

wir möglichst breit ausgebildet werden“, erzählt er. „Unser Vater hat uns schon im Grundschulalter zu diversen Kursen angemeldet – zu einem Gitarrenkurs zum Beispiel, einem Querflötenkurs und auch zu einem Informatikkurs, in dem wir schon erste kleine Sachen programmierten.“ Querflöte und Gitarre gab Krishna schnell auf. Die Informatik aber packte ihn. Nach der Schule machte er – wie etwa 200 000 andere indische Jugendliche seines Jahrgangs – den Eignungstest für die Universität, in dem verschiedene Fächer abgefragt wurden. Er landete auf Platz 18. „Das war das große Los, weil die ersten 20 das Studienfach frei wählen dürfen.“ Er entschied sich für Computer Science and Engineering und zog nach Chennai, wo er am Indian Institute of Technology den Bachelor machte. Es folgten der Master und die Promotion an der University of Washington in Seattle, wo er mehrere Jahre lang als wissenschaftlicher Angestellter arbeitete.

Dass er schließlich in Saarbrücken landete, war ein Zufall. „Ich habe mich 2005 bei verschiedenen Universitäten um eine Festanstellung beworben – unter anderem an der Rice University in Houston. Meine Unterlagen bekam Peter Druschel in die Finger, der damals dort arbeitete.“ Druschel ist Gründungsdirektor des Max-Planck-Instituts für Softwaresysteme. Er war von Gummadis Arbeiten begeistert und fragte diesen, ob er sich vorstellen könne, nach Saarbrücken zu ziehen. Erst zögerte Gummadi, nach Deutschland zu wechseln. Schließlich sagte er zu: Peter Druschel hatte ihm eine Tenure-Track-Stelle angeboten – eine Festanstellung, die in eine Professur münden kann. Dass Krishna Gummadi einmal Direktor am Institut sein würde, war damals nicht abzusehen – und auch nicht, dass er so lange in Saarbrücken bleiben würde. „Doch die Stadt ist erstaunlich international, vielleicht wegen der Nähe zu Frankreich. Und dank der anderen Informatikinstitute auf dem Campus gibt es hier eine hohe Dichte an Fachkollegen.“ Zusammen mit seiner Frau wohnt er an der Saar in einem Dörfchen, dessen größerer Teil in Frankreich liegt. Und noch eines gefällt ihm besonders – die *cuisine* in der Region. Wie es derzeit aussieht, ist Krishna Gummadi gekommen, um zu bleiben.

Und das, obwohl er längere Gespräche nach so vielen Jahren in Deutschland noch immer lieber auf Englisch führt. „Das Institut ist so international, dass hier alle Englisch sprechen. Da bekommt man im Alltag nur wenige Chancen zum Üben.“ Natürlich spricht er beim Einkaufen Deutsch. Aber da seine Frau ebenfalls aus Indien kommt, gibt es zu Hause keinen Grund, Deutsch zu sprechen. Als vor Kurzem eine neue Doktorandin fragte, ob man in Deutschland auch ohne Deutsch überleben könne,

—>

lachten die Mitarbeitenden in Krishna Gummadi's Arbeitsgruppe. „Dafür sei ich ja das beste Beispiel, meinten sie.“

Seit etwa fünf Jahren beschäftigt sich Krishna Gummadi mehr und mehr mit dem Social Computing. Bei der Entwicklung von KI-Algorithmen, die mit maschinellem Lernen arbeiten, gibt man dem Computer ein Ziel vor und lässt die Algorithmen dann einfach machen. „Wir nennen das den deklarativen Ansatz, bei dem ich nur das Ziel definiere – zum Beispiel ‚Suche die beste Bewerbung aus‘. Der Weg über einzelne Entwicklungsschritte interessiert nicht“, sagt Krishna Gummadi. Zu den Werkzeugen, die dabei zum Einsatz kommen, gehören unter anderem die sogenannten tiefen neu-

denen sie angehören oder als denen zugehörig sie wahrgenommen werden.“ Die Informatik muss Bezüge wie „auf Grundlage von Gruppen“ oder „zugehörig“ in Algorithmen gießen – eine Abstraktionsaufgabe, die zunächst nichts mit Bits, Einsen und Nullen zu tun hat. „Wir haben lange überlegt, wie man Diskriminierung abstrahieren könnte, um in Zukunft diskriminierungsfreie Algorithmen zu entwickeln. Dabei sind wir schließlich auf den Aspekt der Neidfreiheit gestoßen“, erzählt Krishna Gummadi. Die Zugehörigkeit zu Gruppen werde unter anderem dann problematisch, wenn die eine Gruppe bevorzugt und die andere benachteiligt werde – so etwas könne Neid erzeugen. Und das lasse sich durchaus mathematisch ausdrücken.

„Inzwischen ist klar, dass wir bei soziotechnischen Systemen Probleme auch informatisch lösen müssen.“

46

ronalen Netze. Zwar liefern diese Algorithmen und neuronalen Netze Ergebnisse, aber man kann nicht mehr nachvollziehen, auf welche Weise der Computer seine Entscheidung getroffen hat. Das Verfahren gleicht einer Black Box. Das wird unter anderem dann problematisch, wenn Frauen seltener zum Vorstellungsgespräch eingeladen werden, weil der Computer sie vorher aussortiert.

„Noch vor wenigen Jahren bezweifelten Informatik-Fachleute, dass es sich in solchen Fällen um ein computertechnisches Problem handelt“, erklärt Krishna Gummadi. „Inzwischen ist klar, dass wir bei soziotechnischen Systemen Probleme auch informatisch lösen müssen.“ Statt wie bisher „utilitaristisch“ nur ein Ziel zu verfolgen – ein Ergebnis mit möglichst geringer Fehlerrate anzustreben –, müsse man künftig zusätzliche Ziele definieren; zum Beispiel Ungleichbehandlung und Diskriminierung zu verhindern. Die Herausforderung bestehe heute auch darin, dem Computer den sozialen Kontext beizubringen.

Der Begriff Diskriminierung wird unter anderem so definiert: „Diskriminierung ist der Akt der Unterscheidung zwischen Menschen auf der Grundlage der Gruppen, Klassen oder anderer Kategorien,

Krishna Gummadi's Social Computing geht über das Thema Diskriminierung hinaus. Ihn interessiert, wie Algorithmen in „digitalen öffentlichen Räumen“ arbeiten – auf Plattformen wie Facebook und Tiktok oder bei Onlineversandhäusern wie Amazon. In einer aktuellen Studie hat er zusammen mit Forschenden des Indian Institute of Technology untersucht, inwieweit die Algorithmen der Amazon-Website Firmen benachteiligen. So ist Amazon längst nicht mehr nur Versandhändler. Das Unternehmen stellt auch eigene Produkte her – und die bietet es in Konkurrenz zu etablierten Herstellern an. Gummadi's Team untersuchte, wie oft auf der Amazon-Seite in dem Fenster „Andere Kunden kauften auch...“ Amazon-eigene Produkte oder die Ware fremder Hersteller angezeigt wurden. Sie konzentrierten sich dabei auf Batterien und Rucksäcke. Die Ergebnisse sind ernüchternd. Bei den Rucksäcken zeigte Amazon doppelt so häufig eigene Produkte an, was allerdings nicht illegal ist. Doch hat Amazon einen weiteren großen Wettbewerbsvorteil: Die Firma gewinnt zugleich unzählige Kunden- und Marktdaten, die den anderen Anbietenden nicht zur Verfügung stehen. „Das kann auf lange Sicht die Marktposition der anderen schwächen und ist im Grunde ein Fall für die Regulierungsbehörden“,

sagt Krishna Gummadi. „Amazon kann nicht gleichzeitig Spieler und der Schiedsrichter sein, der die Regeln festlegt.“ Er sehe seine Aufgabe auch darin, solche Missstände wissenschaftlich fundiert aufzuzeigen. Aktiv werden müssten dann allerdings andere.

Bereits im Jahr 2015 hatte er in einem Projekt zusammen mit Emilio Zagheni, Direktor am Max-Planck-Institut für Demografische Forschung in Rostock, untersucht, welche Daten Facebook in der sogenannten API verwaltet, einer Programmierschnittstelle. Über die API können Firmen Werbung schalten und das Surfverhalten der Nutzer und potenzieller Interessenten beeinflussen. Den Forschenden eröffnete sich ein ganzes Universum an privaten Daten für sozialwissenschaftliche und vor allem demografische Untersuchungen. So konnten die Forschenden Migrationsmuster erkennen und die Wege von Flüchtenden im Krisenfall nachvollziehen. Sie zeigten zudem, dass ein böswilliger Werbekunde eine brisante Menge privater Daten abrufen könnte, einschließlich der Adresse, Telefonnummer und all der persönlichen Angaben aus den Datenbanken, mit denen Facebook verknüpft ist. „Die Menge an privaten Daten, die hier offenlagen, war erschreckend groß“, sagt Krishna Gummadi. „Über die API hatten wir Zugriff auf mehrere Tausend Attribute.“ Gummadi und seine Kooperationspartner brachten dazu einen Fachartikel heraus. Mittlerweile hat Facebook die API-Schnittstelle überarbeitet.

„Es ist schon witzig“, sagt er. „Social Computing ist heute ein heißes Thema – aber im Grunde ist es ein alter Hut, soziale und technische Aspekte zusammenzuführen.“ So hätten viele große Informatiker der ersten Stunde einen sozialwissenschaftlichen Hintergrund – und sich erst später mit Themen wie Kognition oder Entscheidungsfindung beschäftigt und damit den Weg zur künstlichen Intelligenz geebnet. Insofern schließe sich heute mit Social Computing der Kreis. Vor zwei Jahren hat Krishna Gummadi für die Max-Planck-Gesellschaft ein Symposium zur Schnittmenge von Gesellschaft und Computerwissenschaften veranstaltet. Das Interesse war riesig. In kurzer Zeit meldeten sich 270 Teilnehmende aus verschiedenen Max-Planck-Instituten an.

Auch die Menge an Themen ist riesig. Krishna Gummadi und seine Mitarbeitenden stoßen permanent auf neue Aspekte. Momentan interessiert er sich dafür, wie der Algorithmus der Social-Media-Plattform Tiktok arbeitet. Tiktok liefert einen endlosen Strom an Kurzvideos. Ohne dass je-

mand Videos anklickt oder Suchbegriffe eingibt, lernt die Plattform in kurzer Zeit die Vorlieben einer Person kennen. Wie schnell scrollt jemand weiter? Wie lange schaut jemand ein Video an? Bereits nach etwa einer halben Stunde liefert der Algorithmus passgenaue Videos – und hält die Menschen damit auf der Plattform. „Das führt uns zu noch ganz anderen Aspekten von Social Computing“, sagt Krishna Gummadi: „zu der Frage, inwieweit die direkte, oft emotionale Ansprache zu Suchtverhalten führt, zu Depressionen oder zu Vereinsamung.“ Das Schöne an der Arbeit im Saarbrücker Institut sei die Freiheit zu forschen, ohne gleich Ergebnisse liefern zu müssen, sagt der Wissenschaftler. „Meine Neugierde hat hier alle Freiheiten – da kann ich fachlich schon auch mal einen Abstecher machen.“

←

Vom Algorithmus gefesselt: Soziale Medien wie das Videoportal Tiktok sind darauf programmiert, Nutzerinnen und Nutzer völlig in den Bann zu ziehen – mit bislang unklaren psychologischen Folgen.

47



FOTO: ADOBESTOCK / NATYAKORN

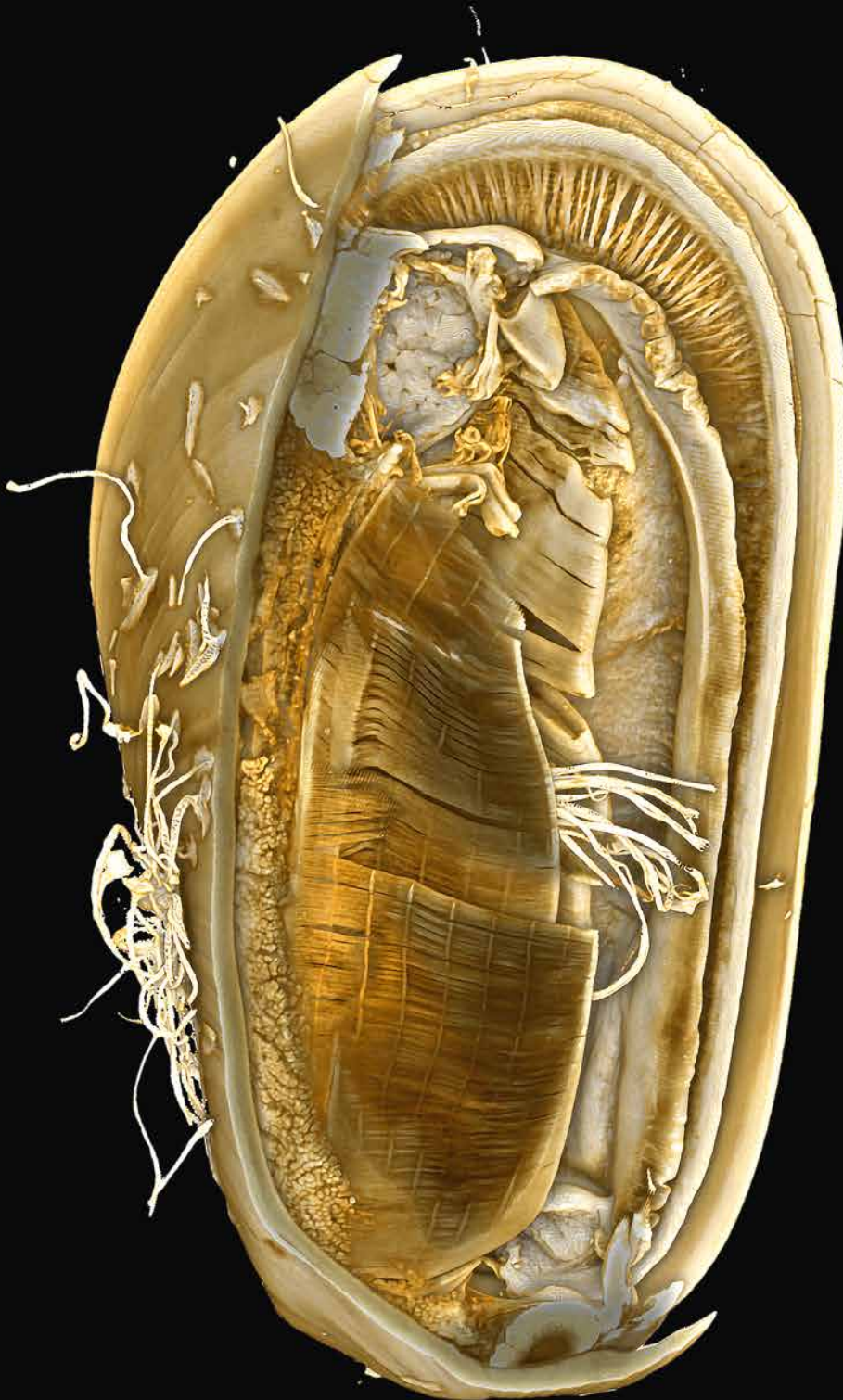


BILD: MPI FÜR MARINE MIKROBIOLOGIE / BENEDIKT GEIER / MAXIMILIAN FRANKE

ZWEITER BLICK

MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR MARINE MIKROBIOLOGIE

Die Tiefseemuschel *Bathymodiolus azoricus* ist eine Verwandte der essbaren Miesmuschel. Sie besiedelt sogenannte Schwarze Raucher – hoch aufragende Schloten auf dem Meeresboden, aus denen bis zu 400 °C heißes, mineralreiches Wasser ausströmt. Um unter solch extremen Bedingungen überleben zu können, ist Teamgeist gefragt: Die Muschel beherbergt in ihrem Innern symbiotische Bakterien, die in der Lage sind, Methan oder Schwefelwasserstoff aus den heißen Quellen zur Energiegewinnung zu nutzen. Die mikroskopisch kleinen Untermieter treten einen Teil der Energie an ihren Wirt ab und bekommen im Gegenzug Logis in einem geschützten Raum, wo sie von schwefel- und methanhaltigem Wasser umspült werden. Das linke Bild gewährt einen Blick unter die Muschelschale. Rechts haben Forschende am Bremer Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie die Mikroben sichtbar gemacht. Diese bilden im Muschelinnern ausgedehnte Kolonien, die hier im Fluoreszenzlicht leuchten.

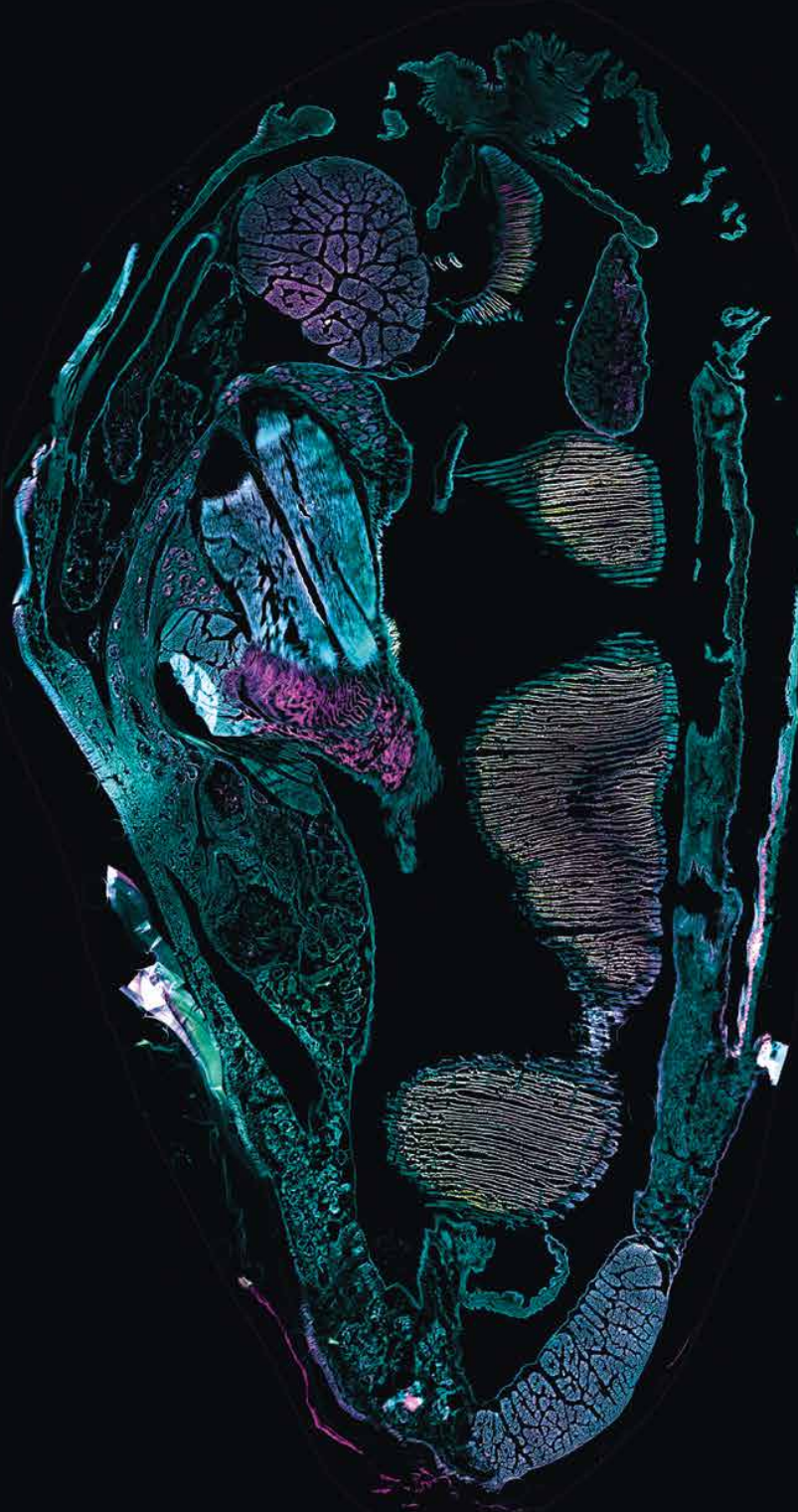


BILD: MPI FÜR MARINE MIKROBIOLOGIE / BENEDIKT GEIER / MAXIMILIAN FRANKE

„EMOJIS STELLEN DAS RECHT AUF DIE PROBE“

INTERVIEW: BARBARA ABRELL

50 Digitale Kommunikation ist anfällig für Missverständnisse. Das gilt besonders dann, wenn Emojis zum Einsatz kommen. Denn die beliebten Piktogramme werden – abhängig von Alter, Geschlecht und kulturellem Hintergrund – oft völlig unterschiedlich verstanden. Daher beschäftigen sie zunehmend auch die Gerichte – etwa wenn Verträge per Mail oder Messenger zustande kommen oder Postings als ehrverletzend empfunden werden. Matthias Pendl hat am Max-Planck-Institut für ausländisches und internationales Privatrecht in Hamburg die Rolle von Emojis im Recht erforscht.

Sich mit Emojis zu beschäftigen, ist für einen Juristen nicht naheliegend. Herr Pendl, was hat Sie motiviert, sich diesem Forschungsthema zu widmen?

MATTHIAS PENDEL Tatsächlich waren meine Bedenken zu Beginn: Wird mein etwas eigentümliches Forschungsinteresse in Fachkreisen gut aufgenommen? Anregungen gab es jedoch erstaunlich viele. Angefangen bei meinem

ehemaligen Chef, der, immer wenn ich eine Arbeit gut gemacht hatte, in seinen E-Mails ein 😊 verwendete, bis zu den Erfahrungen, die ich während der Auflösung meines Hausstandes sammelte, bevor ich von Wien nach Hamburg umzog. Viele meiner Inserate im Kleinanzeigen-Portal Willhaben, das in Österreich sehr beliebt ist, wurden mit Emojis wie 🍑 oder mit diversen Emoji-Gesichtern kommentiert. Als Jurist habe ich mich gefragt: Waren dies bindende Verträge? Dann kam der Lockdown, und ich hatte plötzlich Zeit, an etwas Neuem zu forschen.

Als Kommunikationsmittel ersetzen Emojis oft Intonation, Gestik, Mimik und andere körpersprachliche Elemente. Worin liegen ihre Stärken und Schwächen?

Emojis werden so gerne genutzt, weil sie die Kommunikation mit emotionalen Aspekten anreichern. Die Schwierigkeit liegt allerdings darin – und da kommen wir auch gleich zum juristischen Problem –, dass die Interpretation nicht ganz einfach ist. In unterschiedlichen Kontexten kann ein und dasselbe Emoji so oder so verstanden werden.

Könnten Sie vielleicht ein paar Beispiele für typische Missverständnisse nennen?

Ich habe jüngere Brüder. Einer von ihnen hat mir vor Kurzem erklärt, dass das Tränen lachende Emoji 😂 von seiner Generation – der Generation Z – gar nicht mehr genutzt wird. Wenn er sich über etwas amüsiert, dann verschickt er als Reaktion neuerdings einen Totenkopf ☠️. Das soll bedeuten: Man lacht sich tot über das, was der andere gesagt hat. Ich habe ihm geraten, damit in Whatsapp vorsichtig zu sein – besonders wenn er Nachrichten an die Großeltern verschickt... Die Kommunikation zwischen den Geschlechtern wird häufig arbeitsrechtlich relevant. Oft wird bei Frauen eine Grenze erreicht, wo es nicht mehr lustig ist, zum Beispiel wenn sie von Kollegen das vermeintlich harmlose Emoji der Aubergine 🍆 als Phallussymbol geschickt bekommen oder das Pfirsich-Emoji 🍑 als anzügliche Anspielung auf den menschlichen Po. Im E-Mail-Austausch mit einem Gastwissenschaftler aus China ist mir kürzlich aufgefallen, dass Emojis, die ich ihm geschickt habe, bei ihm gar nicht angezeigt wurden. Neben den Missverständnissen, zu denen

WISSEN AUS

— KULTUR & GESELLSCHAFT



51

Facettenreiches Emoji:
Ist hier jemand in Gedanken versunken, denkt er über Gesagtes nach, hinterfragt er es, oder hält er es gar für fragwürdig? Je nach Kontext wird ein und dasselbe Piktogramm ganz unterschiedlich interpretiert.

Ob Verträge per E-Mail oder Messenger-App zustande kommen, dafür kann die Interpretation von Emojis zur Schlüsselfrage werden.

BILD: GCO NACH MFG

Was sagen Sie zu diesem Angebot?



Perfekt



Ist hier ein Vertrag zustande gekommen? 

52

es sehr oft kommt, wenn Menschen aus unterschiedlichen Kulturkreisen kommunizieren, stößt man bei der Verwendung von Emojis auch noch auf technische Hürden – besonders wenn unterschiedliche E-Mail-Programme genutzt werden.

Welche Relevanz haben Emojis in der Rechtsprechung? Gibt es einen Trend, den Sie beobachten?

Emojis stellen das Zivilrecht auf die Probe: Gerichtsentscheidungen, in denen Emojis eine wichtige Rolle spielen, nehmen quantitativ zu. Auch in Deutschland ist diese Tendenz nicht zu übersehen, wengleich hierzulande die meisten veröffentlichten Urteile Verletzungen des Persönlichkeitsrechts betreffen oder aus dem Arbeitsrecht stammen. Ein Beispiel ist ein Verfahren vor dem Landesarbeitsgericht Baden-Württemberg. Dabei ging es um eine außerordentliche Kündigung, die wegen öffentlich einsehbarer Kommentare auf Facebook ausgesprochen wurde. Unter anderem stand dort in Anspielung auf einen Vorgesetzten: „Das fette 🍑 dreht durch!!! 😂😂😂“ Das Gericht wertete dies als grobe Beleidigung. Die Kündigung musste allerdings wegen fehlender Abmahnung aufgehoben werden.

Dass die Gerichte in diesen Bereichen mit Emojis konfrontiert werden, ist nachvollziehbar. Aber spielen Emojis auch im Strafrecht eine Rolle?

Ja, eine große Rolle sogar. In den Vereinigten Staaten gibt es eine traurige Anzahl an Berichten darüber, wie über die digitale Kommunikation mit Emojis an Schulen Gewalt angedroht wurde. In einem Fall des kalifornischen Court of Appeal beispielsweise hatte eine Minderjährige in ihren Tweets suggeriert, an ihrer Schule einen Amoklauf begehen zu wollen. Ihrer Verteidigung, die zahlreichen benutzten lachenden Emojis seien doch das Zeichen, dass es sich lediglich um einen Scherz gehandelt habe, folgte das Gericht nicht und ging stattdessen von bewusst ausgesprochenen Drohungen aus. Ihr Bedrohungspotenzial entfalten Emojis auch sehr häufig nach gescheiterten Beziehungen. Ein Franzose soll beispielsweise zu einer Haftstrafe verurteilt worden sein, weil er seiner Ex-Freundin ein Pistolen-Emoji 🍷 geschickt hatte, welches das Gericht als Todesdrohung wertete. In Kalifornien wurde ein Mann verurteilt, der seine ehemalige Lebensgefährtin zunächst körperlich misshandelt und ihr anschließend folgende Textnachricht geschickt

hatte: „You have 12 hours to find me, before I find you.“ Zusätzlich hatte er die Nachricht mit verschiedenen Emojis versehen, die unter anderem Bomben 🧨, Pistolen 🍷, Messer 🗡️ und Nadeln 📌 zeigten.

Die Gerichtsurteile bilden die farbigen Piktogramme nur selten ab; sie verwenden lediglich das Wort „Emoji“ – häufig in eckigen Klammern geschrieben – oder „[lachendes Emoji]“, „[trauriges Emoji]“ oder „[erstaunte Emojis]“. Woran liegt dies?

EMOJIS, EMOTICONS & CO.

Emojis und Emoticons sind nur auf den ersten Blick ähnlich. Emoticons bestehen aus Punkten, Strichen, Klammern, Buchstaben und Zahlen und ergeben – seitwärts gelesen – ein Symbol, das eine bestimmte Mimik widerspiegelt. Der Begriff setzt sich aus den englischen Wörtern *emotion* für „Gefühl“ und *icon* für „Symbol“ zusammen. Bekannte Beispiele sind neben dem lachenden Gesicht :-), etwa das traurige :-(, das zwinkernde ;-), oder auch das erstaunte :-O. In anderen Kulturkreisen werden häufig ganz andere Emoticons verwendet, zum Beispiel in Japan Kaomojis, die auch ganz anders aussehen. Für einen glücklichen Gesichtsausdruck steht beispielsweise ٩(●◡●)ε.

Emojis hingegen sind bunte Piktogramme oder Ideogramme – wie beispielsweise 🍌 und 🍌. Sie werden durch eine einheitliche Codierung, den Unicode, bestimmt. Dieser bildet die technische Grundlage für Text und Symbole in moderner Software und regelt die Verwendung in digitalen Medien. Inzwischen gibt es viele animierte Emojis, die sich bewegen – die zum Beispiel die Augen rollen oder einem aktiv zuzwinkern.

Das ist eine wichtige Frage, auf die ich keine eindeutige Antwort habe. Ich war selbst nie Richter. Deshalb weiß ich es schlicht nicht und kann nur Vermutungen anstellen. Wahrscheinlich ist es zu aufwendig, die farbigen Piktogramme einzubinden – ich kenne nur einen Fall, in dem ein Screenshot verwendet wurde –, zumal die Urteile meist schwarz-weiß sind, wenn sie ausgedruckt werden.

Oder das Urteil selbst wirkt weniger seriös ...

Ja, diese Befürchtung könnte auch bestehen. Emojis werden bisweilen als nicht formell genug für den juristischen Sprachgebrauch eingeschätzt. Das halte ich jedoch für problematisch. Wenn Emojis in einem Fall entscheidend sind, ist es wichtig zu wissen, wie sie tatsächlich aussehen, sonst gehen wesentliche Informationen verloren.

Sie haben die Rechtsprechung in sieben verschiedenen Ländern untersucht – in den USA, Kanada,

in Großbritannien, Australien, Deutschland, Österreich und Israel. Gibt es gravierende Unterschiede im nationalen Vergleich?

Für einen direkten Vergleich ist die Datenlage noch zu dünn. In Deutschland beispielsweise gab es bislang auch kaum Untersuchungen dazu. Deshalb habe ich versucht, diese Lücke zu schließen. Generell ist der Diskurs unterschiedlich weit fortgeschritten: Vor allem in den USA, aber auch in Kanada existiert ein deutlich größeres Bewusstsein für die Bedeutung von Emojis in der Kommunikation. Hier wird – ähnlich wie in Australien – die Literatur auch in den Urteilen rezipiert und genauer auf das Phänomen eingegangen.

Social-Media-Plattformen, Messengerdienste aber auch Videoplattformen propagieren den Einsatz von Emojis, manche belohnen ihn sogar, indem Beiträge, die Emojis enthalten, präfe-

riert dargestellt werden. Leidet dadurch unsere Kommunikation?

Ich persönlich habe mittlerweile eine sehr positive Einstellung zu Emojis. Indem man die Schriftsprache mit emotionalen Elementen anreichert, gewinnt unsere Kommunikation mehr, als dass sie darunter leidet. Aber je nachdem, wen Sie fragen, werden Sie wahrscheinlich unterschiedliche Antworten erhalten.

Wie beurteilen Sie die minimalistische Tendenz, auf eine Mitteilung lediglich mit einem Emoji zu reagieren?

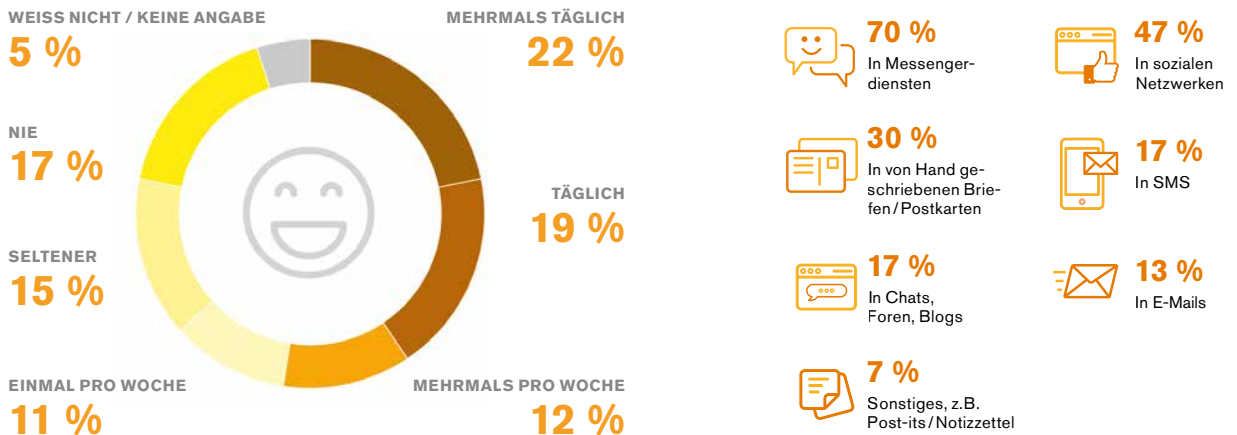
Hier sehe ich keinen umfassenden Trend. Allerdings gibt es durchaus Linguisten, die Emojis das Potenzial zuschreiben, eine alternative Sprache auszuformen. Doch das ist – soweit ich verstanden habe – ein sehr umstrittenes Feld.

Herzlichen Dank für das Gespräch!



Verwendung von Emojis in Deutschland

BILD: GCO NACH BITKOM RESEARCH 2021



Befragt wurden 1004 Personen in Deutschland ab 16 Jahren. Quelle: Bitkom Research 2021

Befragt wurden 788 Personen in Deutschland, die Emojis nutzen; Mehrfachnennungen möglich. Quelle: Bitkom Research 2021

Der Interessenverband Bitkom, der mehr als 2000 Unternehmen der Informations- und Telekommunikationsbranche vertritt, führt regelmäßig Umfragen zu digitalen Themen durch. Die beiden Erhebungen aus dem letzten Jahr zeigen, wie häufig die Deutschen Emojis einsetzen – nicht nur in elektronischen Medien, sondern auch handschriftlich.

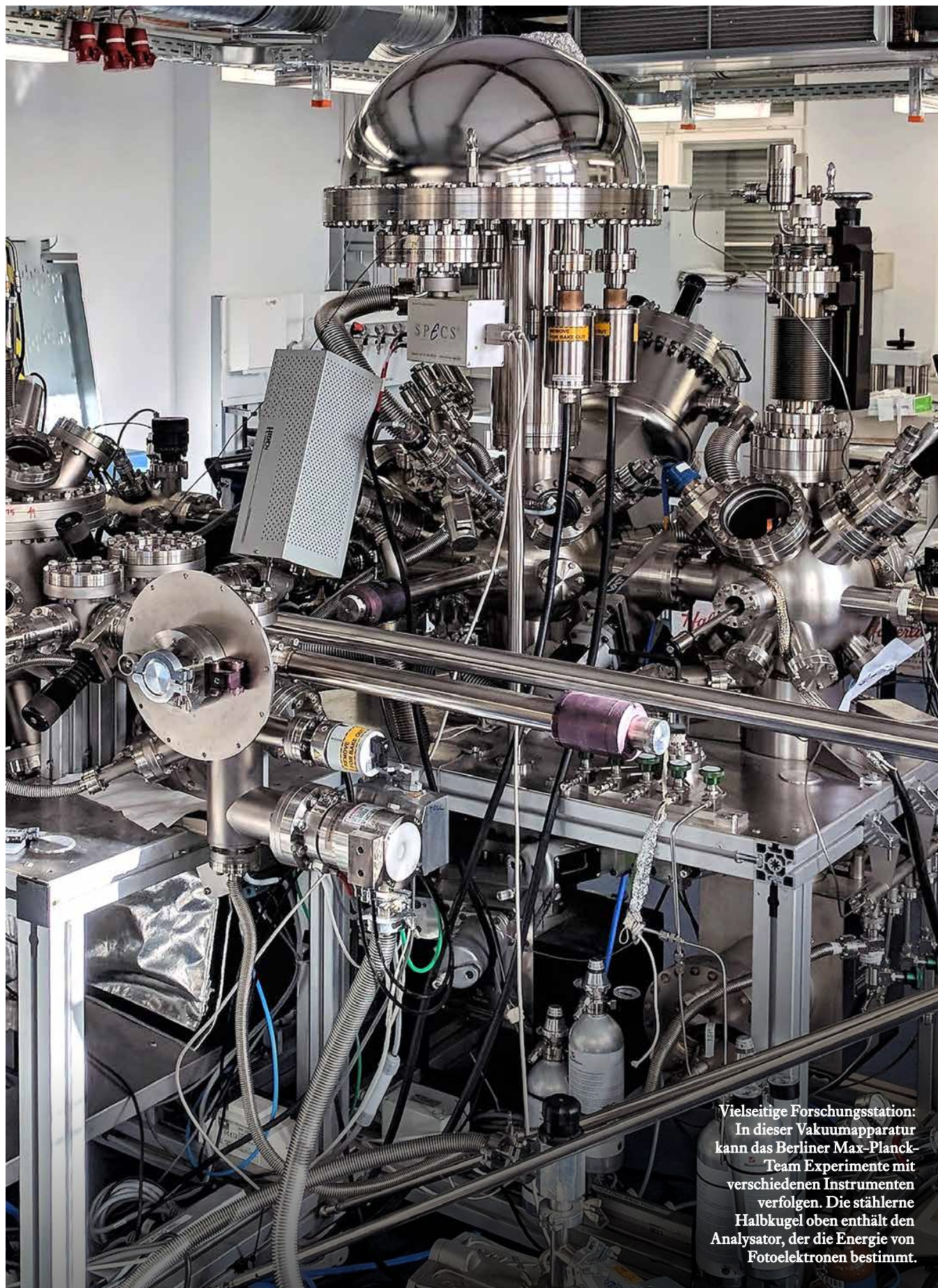


FOTO: FRITZ-HABER-INSTITUT DER MPG

Vielseitige Forschungsstation:
In dieser Vakuumapparatur kann das Berliner Max-Planck-Team Experimente mit verschiedenen Instrumenten verfolgen. Die stählerne Halbkugel oben enthält den Analysator, der die Energie von Photoelektronen bestimmt.

TREIBHAUSGAS UNTER STROM

TEXT: KARL HÜBNER

Aus dem Treibhausgas Kohlendioxid sollen künftig wichtige Chemikalien und Kraftstoffe entstehen. Die Chemie würde damit einen großen Schritt hin zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft machen. Die Gruppe von Beatriz Roldán Cuenya am Berliner Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft erforscht, wie sich das bewerkstelligen lässt.

Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre steigt unaufhaltsam – mit den bekannten Folgen fürs Klima. Diesen Trend zu stoppen, ist eine Mammutaufgabe. In einigen Bereichen wie etwa der Müllverbrennung oder der Zementproduktion lässt sich allerdings kaum vermeiden, dass Kohlendioxid entsteht. Immerhin könnte man das Gas aber dort einfangen, wo es frei wird. Und dann etwa in unterirdischen Lagerstätten entsorgen. Oder es könnte als Rohstoff für die Synthese von Kraftstoffen und Chemikalien dienen – eine Art Kohlenstoffrecycling also. Eine solche CO₂-neutrale Produktion hätte gleich zwei positive Effekte: Erstens würde das

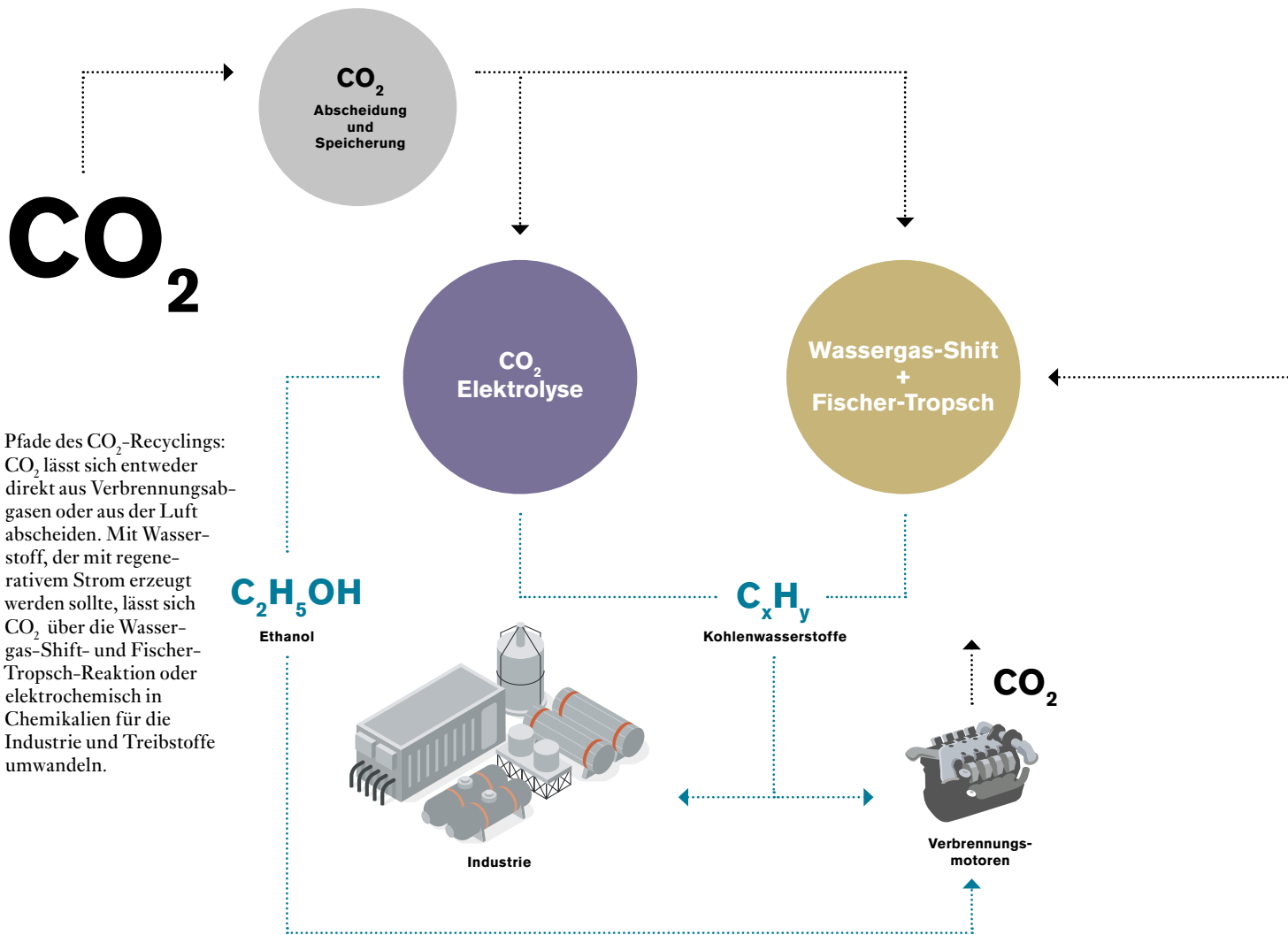
CO₂ dann nicht unmittelbar entweichen, und zweitens ließen sich fossile Rohstoffe sparen.

Weltweit und auch in der Max-Planck-Gesellschaft arbeiten Forschungsgruppen daran, Kohlendioxid als Rohstoff für nützliche Chemikalien zu verwenden (siehe *MaxPlanckForschung* 3/2021). Industriell wird das Gas bereits zusammen mit Wasserstoff zu Methanol umgewandelt, einem wichtigen Grundstoff der chemischen Industrie. Im Einsatz ist darüber hinaus ein Verfahren, das eine Gruppe um Walter Leitner, Direktor am Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion, gemeinsam mit einem Team der heutigen Covestro AG entwickelt hat. Damit wird schon seit einigen Jahren ein Polymer für die Herstellung von Schaumstoffen für Matratzen teilweise aus CO₂ gewonnen (siehe *MaxPlanckForschung* 2/2019). Das spart einen Teil des Erdöls, aus dem die entsprechende Poly-

merkomponente üblicherweise gewonnen wird. CO₂ chemisch zu nutzen ist allerdings nicht trivial, weil es ein sehr stabiles Molekül ist. Man muss einiges an Energie zuführen, um es in Reaktionslaune zu versetzen. So findet die genannte Methanolsynthese bei hohem Druck und hoher Temperatur statt. Es gibt jedoch auch den Ansatz, CO₂ nicht mit thermischer Energie, sondern durch elektrische Energie zur Reaktion zu bringen. Dieser elektrokatalytische Weg ist vergleichbar mit der elektrolytischen Wasserstoffherzeugung aus Wasser. Idealerweise sollte der benötigte Strom natürlich jeweils „grün“ sein, also aus Solar- oder Windenergie stammen.

Ein mögliches Produkt der CO₂-Elektrolyse ist Kohlenmonoxid (CO). Zusammen mit Wasserstoff, der auch regenerativ erzeugt sein sollte, lassen sich aus diesem Gas zahlreiche wichtige Grundstoffe der Chemie gewinnen.





56

nen – und das in einer bereits existierenden industriellen Infrastruktur. Doch daneben gibt es auch die Idee, manche dieser Grundstoffe direkt elektrokatalytisch aus CO₂ (und Wasser) zu erzeugen. Daran forscht auch das Team von Beatriz Roldán Cuenya, Direktorin am Berliner Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft. Die Forscherinnen und Forscher haben dabei insbesondere Ethylen (auch als Ethen bekannt) und Ethanol im Blick. „Gerade die sind sehr interessant, weil sie einen hohen Energiegehalt haben und sich leicht lagern lassen“, erklärt Roldán Cuenya. Ethylen sei zudem die Ausgangssubstanz für den mengenmäßig bedeutendsten Kunststoff Polyethylen (PE) und auch ein wichtiger Baustein für viele Chemikalien in völlig unterschiedlichen Branchen. Bislang wird Ethylen

ausschließlich aus fossilen Rohstoffen hergestellt. Ethanol wiederum eignet sich aufgrund seiner guten Verbrennungseigenschaften als Kraftstoff und wird bereits heute Superbenzin beigemischt. Für Roldán Cuenya sind Ethanol und Ethylen auch auf lange Sicht „unverzichtbare molekulare Bausteine der Chemie“. Sie fossilfrei aus CO₂ und grünem Wasserstoff zu erzeugen, hält die Physikerin aus diesem Grund für eine „vorrangige Aufgabe im Rahmen der chemischen Energiekonversion“.

Aus wissenschaftlicher Sicht geht es vor allem darum, für die Erzeugung von Ethylen und Ethanol passende Katalysatoren zu entwickeln. Das machen die Berliner nicht nur für die Elektrolyse von CO₂, sondern etwa auch für die von Wasser, das dabei in Wasser-

stoff und Sauerstoff gespalten wird. Für die Wasserspaltung sucht Beatriz Roldán Cuenyas Team aktuell nach Katalysatoren, welche das für die Sauerstoffbildung gängige, jedoch teure Iridium ersetzen könnten. Das Ziel: die gesamte Elektrolyse und damit auch die Wasserstoffsynthese wirtschaftlicher zu machen. Grüner Wasserstoff ist ein großer Hoffnungsträger, der einmal in sehr vielen Bereichen fossile Rohstoffe ersetzen soll – zum Beispiel in der Stahl- oder der Chemieindustrie. Auch grünes Ammoniak ließe sich damit synthetisieren und könnte auf diese Weise als Speicher für (grünen) Wasserstoff und dessen Transport mit Tankern und durch Pipelines fungieren. Daneben ist Ammoniak der zentrale Ausgangsstoff für die Herstellung von Kunstdünger.



Grüne elektrische Energie

 H_2  H_2O

Doch zurück zur CO_2 -Elektrolyse. Die gute Nachricht: Es gelingt bereits, die beiden Wunschsubstanzen Ethylen und Ethanol elektrolytisch aus CO_2 zu gewinnen. Wie das im kleinen Maßstab aussieht, führt Clara Rettenmaier, Mitarbeiterin in Roldán Cuenyas Abteilung, in einem der Labore am Fritz-Haber-Institut vor. Man sieht ein zylindrisches Glasgefäß mit einer farblosen Flüssigkeit, durch die Gasblasen blubbern. In diese Flüssigkeit ragt eine Art Stift, an dessen unterem Ende eine Centmünze montiert ist. „Der Stift ist die Elektrode, an die wir eine Spannung anlegen, um das CO_2 , das sich aus den Gasblasen im Wasser löst, zu reduzieren. Die Kupfermünze ist unser Katalysator“, erklärt die Chemikerin. Die Münze diene als plakatives Vorführobjekt für Besucher. Die tatsächli-

chen Katalysatoren seien viel kleiner und für das menschliche Auge unsichtbar.

An einem Computer neben der Apparatur ruft die Chemikerin mit ein paar Klicks Messkurven auf, die Auskunft über die entstandenen Produkte geben. „Hier, das ist Ethylen“, sagt Clara Rettenmaier und zeigt auf einen Peak. Dann wandert ihr Finger weiter. „Das ist Methan, dort Kohlenmonoxid und hier vorne Wasserstoff“, benennt sie einige der weiteren Ausschläge.

Suche nach dem selektiven Prozess

Damit ist das Problem umrissen, mit dem die Gruppe noch kämpft. „Prinzipiell können aus CO_2 eine ganze Reihe von Verbindungen entstehen, leider oft gleichzeitig“, erklärt Beatriz Roldán Cuenya. Dass die angelegte Spannung auch Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff spaltet, ist ein weiteres Problem. Weil Produktgemische die Weiterverarbeitung aufwendig und teuer machen, sei es für ein ökonomisch lohnendes Verfahren wichtig, eine einzige gewünschte Substanz in möglichst hoher Ausbeute zu erhalten, erklärt Roldán Cuenya.

Die Frage für ihre Forschungsabteilung ist also: Wie kann man die Elektrolyse steuern, sodass möglichst viel Ethylen oder Ethanol entsteht? Klar ist, das geht nur mit dem richtigen Katalysator. Dieser hat grundsätzlich die Aufgabe, die Bindungen in CO_2 zu brechen, bestimmte Zwischenprodukte zu stabilisieren und so neue Bindungen zu ermöglichen. Was genau sich während der Reaktion auf der Oberfläche des Katalysators abspielt – das untersucht das Team von Beatriz Roldán Cuenya.

Bislang ist Kupfer das einzige bekannte Katalysatormaterial, mit dem es überhaupt gelingt, CO_2 elektrochemisch in Verbindungen mit zwei oder mehr Kohlenstoffatomen umzuwan-

deln. Nur an Kupfer kommt es im Laufe der Elektrolyse zu der nötigen Kohlenstoff-Kohlenstoff-Kopplung. Ganz offenbar sind die Abstände der Kupferatome im Kupfermetallgitter sowie die Stärke der Bindungen zwischen Kupfer- und Kohlenstoffatomen dafür optimal.

Anders als in der Vorführapparatur finden die eigentlichen Versuche nicht mit einer Kupfermünze, sondern mit winzig kleinen Kupferwürfelchen statt. Diese sogenannten Nanocubes stellt das Berliner Team selbst her. Von den Würfeln müsste man etwa tausend aneinanderreihen, um auf den Durchmesser eines Haares zu kommen. Daher hat das Kupfer in dieser Form pro Gramm eine viel größere Oberfläche als die Centmünze. An der gleichen Menge Kupfer kann damit viel mehr CO_2 reagieren. Die Forschenden fixieren die Katalysatorwürfelchen direkt auf der Elektrode, die sie dann in CO_2 -durchströmtes Wasser halten, dessen Elektrolyseeigenschaften durch gelöstes Kaliumsalz verbessert werden.

57

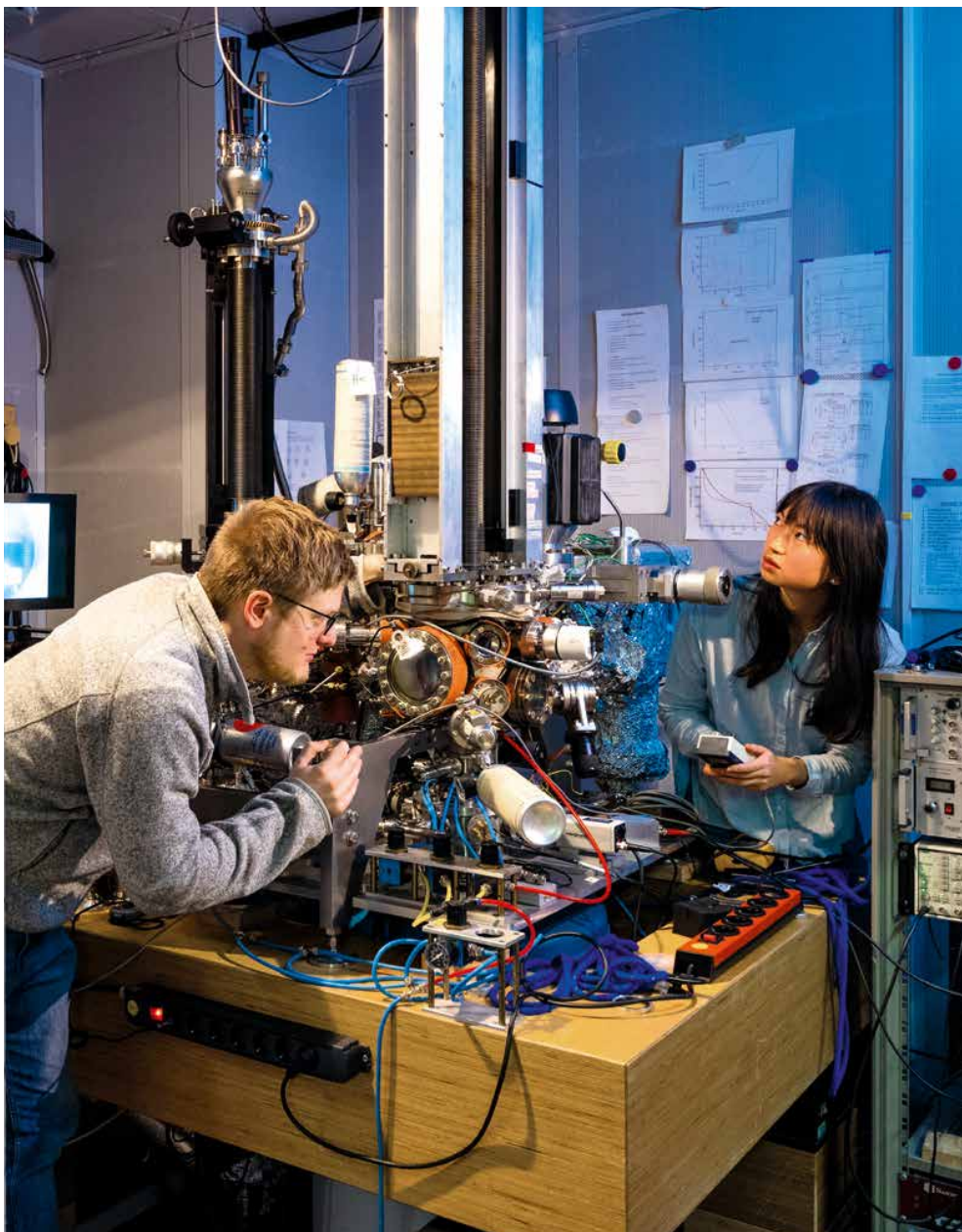
→

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Weltweit arbeiten zahlreiche Forschungsgruppen daran, aus Kohlendioxid Kraftstoffe oder Substanzen für die Chemieproduktion zu gewinnen.

Die Gruppe von Beatriz Roldán Cuenya versucht, mithilfe der Elektrolyse gezielt und mit hoher Ausbeute Chemikalien für die Industrie und Treibstoffe zu erzeugen.

Experimente haben ergeben, dass sich die Reaktion durch die Form und die chemischen Eigenschaften des nötigen Kupferkatalysators bevorzugt zu Ethylen oder Ethanol steuern lässt.



Nanoskopischer Tastsinn: Felix Landwehr und Claudia Khanh-Ly Nguyen justieren ein Rasterkraftmikroskop, mit dem sich Profile von Oberflächen erstellen lassen.

FOTO: FHI / JÜRGEN LOSEL

58

Zwar passt die Elektrolysezelle in eine Kaffeetasse, dennoch füllen die Apparaturen der Berliner Gruppe ganze Räume. Das liegt daran, dass manche Messmethoden umso mehr Platz benötigen, je kleiner die Struktur ist, die man betrachten möchte. Die Forscherinnen und Forscher interessieren sich schließlich, was mit dem Katalysator während der Elektrolyse auf atomarer Ebene passiert – also im Bereich von einem millionstel Millimeter. Um dies in allen chemischen und physikalischen Details sichtbar machen zu

können, verfügt die Abteilung über einen enormen Gerätepark, der sich über etliche große Labors und sogar mehrere Gebäude verteilt. Manche Methoden, wie etwa die Elektronenmikroskopie, haben Beatriz Roldán Cuenya und ihr Team eigens so weiterentwickelt, dass sie auch in der wässrigen Umgebung der Elektrolyse anwendbar sind.

Mitunter müssen mehrere Messtechniken in einem Experiment kombiniert werden. Erst dadurch ließ sich zum

Beispiel erkennen, dass die eigentlich aktiven Zentren des Katalysatormaterials sich nur unter Reaktionsbedingungen ausbilden und sich dabei auch noch ständig verändern. Mithilfe der Flüssigphasen-Elektronenmikroskopie hat das Team inzwischen auch andere Veränderungen des Katalysators während der CO_2 -Elektrolyse sichtbar gemacht. „Wir haben beobachtet, dass die Katalysatorwürfel im Laufe einer Elektrolyse ihre Form und Größe verändern“, erklärt Beatriz Roldán Cuenya. Es ist

klar, dass derlei morphologische Veränderungen auch die katalytischen Eigenschaften beeinflussen. An einen möglichen industriellen Routinebetrieb wäre daher erst zu denken, wenn man weiß, wie sich die aktiven Phasen dieser Katalysatoren stabilisieren lassen.

Eine andere wichtige Sache, die das Team herausgefunden hat: Die aktiven Zentren des Katalysators für die unerwünschte Nebenreaktion, bei der aus Wasser Wasserstoff abgespalten wird, sind andere als jene für die elektrokatalytische Reduktion von CO_2 . Und die Forschenden haben auch herausgefunden, dass es offenbar eine ideale Würfelgröße gibt. „Sind die Würfel zu klein, lösen sie sich einfach ab und lagern sich an anderer Stelle an“, so Roldán Cuenya. Dies sei ein Nachteil, denn durch die Zusammenballungen gehe katalytisch aktive Oberfläche verloren.

Aber auch chemisch verändert sich der Katalysator im Verlaufe der Reaktion, wie eine Untersuchung mit der Röntgenphotoelektronenspektroskopie zeigte. Die Lehrbuchregel, ein Katalysator verändere sich im Laufe einer

Reaktion nicht, stimmt also so pauschal nicht. Anfangs lag der chemische Kuppler aufgrund des Herstellungsprozesses in oxidiert Form vor, doch dann wurde er nach und nach bis zu einem gewissen Anteil zu elementarem Kupfer reduziert. Das Problem: Dieses steuert die Reaktion in eine andere Richtung als das Oxid.

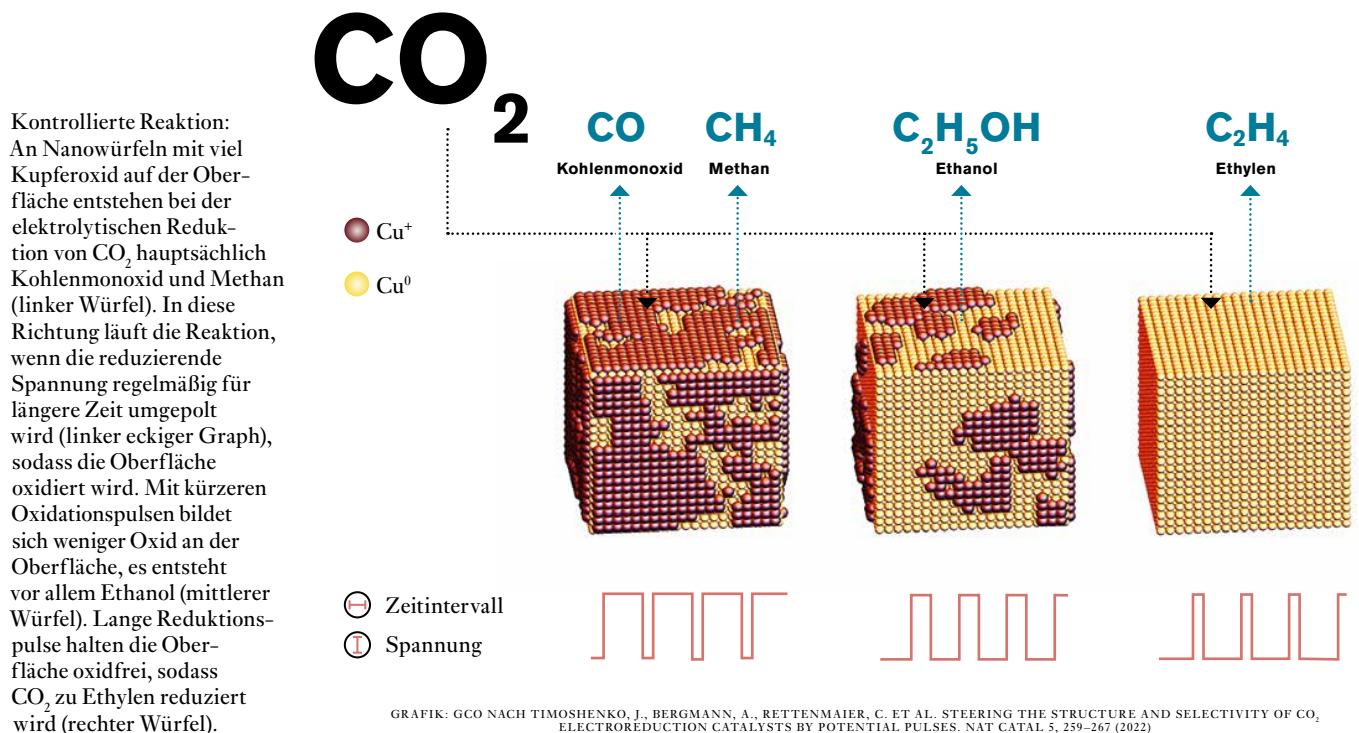
Anti-Aging für den Katalysator

Doch die Wissenschaftler hatten eine pfiffige Idee, wie sich die Umwandlung zu reinem Kupfer im Reaktionsgeschehen kontrollieren lässt: Der Prozess müsste sich nach einer Weile einfach umkehren lassen, indem man eine Spannung mit umgekehrter Polung anlegt. Das sollte die metallischen Kupferatome wieder oxidieren und eine Art Regenerierung des Katalysators bewirken. Die Gruppe startete Versuche, in denen sie die Spannung pulsweise und mit wechselnden Vorzeichen anlegte. In der Tat gelingt es mit diesem Vorgehen, Verände-

rungen auf dem Katalysator rückgängig zu machen. Beatriz Roldán Cuenya spricht von einem Anti-Aging. Der regelmäßige Vorzeichenwechsel bei der Spannung hatte aber noch einen anderen Effekt: Er wirkte als Selektivitätshebel, denn über die Dauer der jeweiligen Pulse lässt sich die Bildung bestimmter Produkte fördern. Lange Reduktionspulse etwa führen bevorzugt zu Ethylen, lange Oxidationspulse zu mehr Kohlenmonoxid. Kombiniert man wiederum kurze Oxidationspulse mit langen Reduktionspulsen von mehreren Sekunden, erhöht dies deutlich die Ausbeute an Ethanol.

Was dabei genau geschieht, hat das Team inzwischen dank seiner umfangreichen Analytik ganz gut sichtbar machen können. So beobachteten die Forschenden, dass dann vermehrt Ethanol synthetisiert wird, wenn sich dünne, ungeordnete Kupferoxid-Anhäufungen auf der Oberfläche des elementaren Kupfers bilden. Ethylen entsteht hingegen offenbar eher an elementarem Kupfer als an oxidiertem. Damit ist plausibel, warum unter anderem lange Reduktionspulse

59



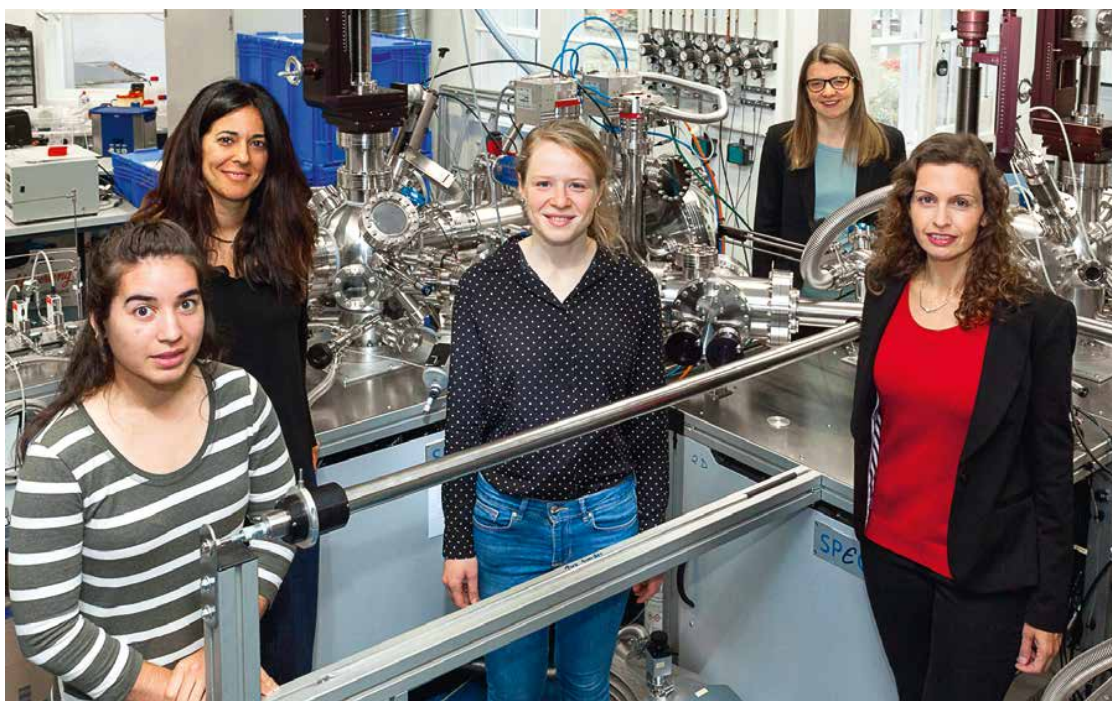


FOTO: FHI / CHRISTIAN TESSMAR

Tiefgang an der Oberfläche: Lara Celeste Chaves, Rosa Maria Arán-Ais, Clara Rettenmaier, Antonia Herzog und Beatriz Roldán Cuenya (von links) untersuchen, wie sich die elektrokatalytische Umwandlung von CO_2 kontrollieren lässt.

60

gerade die Ethylensynthese fördern. Das Team am Berliner Fritz-Haber-Institut erkennt mit seinen Methoden auch, welchen Einfluss beispielsweise Fehlstellen oder Fremdmetallatome im Kupferatomgitter auf die Elektrolyse haben. So stellte sich heraus, dass ein Zusatz von fünf Prozent Silber die Ethanol synthese beflügelt.

Ein Beitrag gegen den Klimawandel

Noch sind all das erste Erkenntnisse zu möglichen Stellschrauben für die Selektivität. „Aktuell geht es vor allem darum, die Mechanismen besser zu verstehen“, betont Beatriz Roldán Cuenya. Und fügt erklärend hinzu: „Man kann einfach keine Sprünge machen, bevor man nicht laufen gelernt hat.“ Will heißen: Noch gibt es einiges zu lernen, bevor man in der Lage

sein wird, den für eine bestimmte Wunschreaktion optimalen Katalysator gezielt designen zu können und in die großtechnische Anwendung zu bringen.

Auch wenn die industrielle Anwendung noch in einiger Ferne liegen mag, so ist es der Max-Planck-Direktorin wichtig, „Grundlagenforschung mit gesellschaftlicher Relevanz“ zu betreiben. In ihren Visionen stellt sich Roldán Cuenya vor, dass solche elektrochemischen Prozesse eines Tages direkt mit CO_2 aus der Luft stattfinden werden. Auch an den dafür benötigten Direct-Air-Capture-Technologien wird bereits vielerorts geforscht. Dem Klimawandel zu begegnen und Energiewirtschaft und Chemie vollkommen neu, nämlich nachhaltig auszurichten – das hält Beatriz Roldán Cuenya für eine der größten gesellschaftlichen Aufgaben. Und sie möchte dazu beitragen, diese Aufgabe zu lösen.

GLOSSAR

ELEKTROLYSE

Mithilfe einer Spannung zwischen zwei Elektroden werden Substanzen in einem Elektrolyten chemisch umgewandelt. Die eine Elektrode (Anode) nimmt dabei Elektronen von einer Substanz im Elektrolyten auf, die andere (Kathode) gibt Elektronen an eine andere Substanz ab.

FLÜSSIGPHASEN-ELEKTRONENMIKROSKOPIE

Die Elektronenmikroskopie bildet mit einem Elektronenstrahl atomare Strukturen ab. Sie erfordert ein sehr gutes Vakuum; Beatriz Roldán Cuenya hat einen Weg gefunden, Proben dennoch auch in Flüssigkeiten zu untersuchen, die normalerweise sofort verdampfen würden.

KATALYSATOR

Ein Stoff, der die energetische Hürde für eine Reaktion senkt und dabei die Bildung bestimmter Produkte erleichtert oder überhaupt erst ermöglicht.

RÖNTGENPHOTOELEKTRONEN-SPEKTROSKOPIE

Ein Röntgenstrahl katapultiert aus der Oberfläche einer Probe Elektronen, welche Aufschluss über die chemischen Eigenschaften der Oberfläche geben.





*FORWARD.
VISION.
FUTURE.*

€ 25,000

Apply until
February 15th, 2023

The Hermann Neuhaus Prize recognizes excellent postdocs and group leaders in the Biology & Medicine Section (**BMS**) and the Chemistry, Physics & Technology Section (**CPTS**). The prize enables the successful applicant to develop her or his research's potential for application.

For more information visit
www.mpg.de/hermann-neuhaus-prize

Hermann Meißner's
**Hermann
Neuhaus
Prize**

Ausgeklügelte Windungen:
Die Plasmakammer von
Wendelstein 7-X ist wie
eine in sich verdrehte
Teigschlange gebaut. Ihre
Wand ist mit besonders
robusten Grafitkacheln
ausgekleidet.



BRENNPUNKTE DER KERNFUSION

TEXT: ANDREAS MERIAN

Im Dezember 2022 hat die National Ignition Facility in den USA einen Durchbruch in der Fusionsforschung verkündet. Die Kernfusion verspricht eine saubere und praktisch unerschöpfliche Energiequelle. Diese anzuzapfen, daran arbeitet auch das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. Seine wissenschaftliche Direktorin Sibylle Günter und der emeritierte Direktor Karl Lackner ordnen ein, wo einige der staatlichen und privaten Fusionsprojekte stehen – auch im Vergleich zu den Konzepten, an denen ihr Institut forscht.

In einem Glas Meerwasser steckt so viel Energie wie in einem Barrel Öl. Doch während beim Verbrennen der 159 Liter Öl mehr als 300 Kilogramm CO₂ frei werden, entsteht keinerlei Treibhausgas, wenn die Energie aus dem Wasser herausgeholt wird. Um sie überhaupt nutzen zu können, muss allerdings zunächst die Kernfusion gemeistert werden. Deren Versprechen sind groß: praktisch unbegrenzte Energie, und das sauber; das heißt: auch ohne langlebigen radioaktiven Abfall. Die Kernfusion könnte erneuerbare Energiequellen in Zeiten und Gegenden mit wenig Wind und Sonne ideal ergänzen.

Fusionsenergie entsteht, wenn leichte Atomkerne verschmelzen. Das passiert natürlicherweise jedoch nur bei Bedingungen, wie sie etwa in der Sonne herrschen. Die Voraussetzungen versuchen Wissenschaftlerinnen und Ingenieure seit Jahrzehnten auch technisch zu erreichen. Weil die Fusionsforschung aber immer noch ziemlich weit weg ist von einem Strom produzierenden Kraftwerk, sprechen manche sarkastisch von der Fusionskonstante: Die Stromerzeugung durch einen Fusionsreaktor liege immer dreißig oder gar fünfzig Jahre in der Zukunft.

Derzeit ist Iter das größte und mit aktuell geschätzten Kosten von 18 bis 22 Milliarden Euro teuerste Fusionsprojekt weltweit. Der Name steht für International Thermonuclear Experimental Reactor und ist ein Forschungsprojekt von EU, USA, China, Indien, Südkorea, Japan und Russland. Auch das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik ist daran beteiligt. Iter soll etwa zehnmals so viel Fusionsenergie freisetzen, wie direkt in die Fusionsreaktion fließt, um diese zu

starten. Doch Strom wird Iter nicht erzeugen. Das soll erst in einem Demonstrationskraftwerk geschehen, das unter dem schlichten Namen Demo geplant wird und das Zusammenspiel sämtlicher Kraftwerkskomponenten erproben soll. Es soll gebaut werden, sobald die Experimente an Iter abgeschlossen sind. Doch das kann noch dauern.

Ursprünglich sollte Iter bereits 2016 den Betrieb aufnehmen. Dann hieß es, der Reaktor stehe 2025 und könne 2035 Energie erzeugen. Doch vor Kurzem wurde öffentlich, dass auch dieser Zeitplan nicht zu halten ist. „Iter ist nicht nur ein wissenschaftliches Projekt, sondern hat auch eine politische Komponente“, sagt Sibylle Günter, Direktorin am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching. Die politischen Randbedingungen führen auch zu technischen Schwierigkeiten. Denn die Partnerländer teilen sich nicht nur die Finanzierung, sondern auch die Entwicklung und Fertigung. „Die Einzelkomponenten des Reaktors werden also in den verschiedenen Ländern hergestellt, mit dem Erge-

63

→

nis, dass am Ende nicht alles wie geplant zusammenpasst“, sagt Sibylle Günter. Auch in einer Pressemitteilung von Iter ist von „umfangreichen Reparaturen“ die Rede.

Trotz oder gerade wegen des mühsamen Fortschritts bei diesem staatlich geförderten Großprojekt arbeiten inzwischen auch zahlreiche Unternehmen an der Kernfusion. Denn die Aussicht auf unbegrenzte saubere Energie ist zu verlockend. So versuchen sich laut der Fusion Industry Association weltweit 33 Firmen an diesem Vorhaben. Dabei verfolgen sie teilweise grundlegend andere technische Ansätze der Kernfusion und versprechen – ihren Investoren wie auch der Allgemeinheit – die baldige kommerzielle Nutzung der Fusionsenergie. Zu diesem Zweck haben die Unternehmen bislang mehr als 4,7 Milliarden US-Dollar an Investitionen eingeworben. Doch während die Start-ups sicherlich agiler sind als staatliche Projekte wie Iter, stehen sie in puncto wissenschaftlich-technischer Machbarkeit oftmals auf weitaus wackligen Füßen. „Die Ansätze, die der Forschungsmainstream aktuell verfolgt, sind Kompromisse“, sagt Karl Lackner. Der emeritierte Direktor am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching forschte selbst jahrzehntelang zur Kernfusion und erlebte sowohl Fortschritte als auch unerwartete Hindernisse bei dem Verfahren, auf dem auch Iter beruht. „Ein Reaktor wie Iter bietet eine Lösung für alle Probleme, die wir bisher erkannt haben – für keines die optimale, aber für alle zumindest eine ausreichende Lösung. Einige der alternativen Ansätze lösen ein Problem hervorragend und sind daher spannend. Doch für die anderen Probleme gestaltet sich die Lösung schwieriger oder ist eventuell sogar unmöglich.“

Allen Ansätzen gemeinsam ist, dass sie sich den Prozess zum Vorbild nehmen, mit dem die Sonne Energie erzeugt: In ihr fusionieren die Kerne von Wasserstoffatomen bei einem Druck von rund 200 Milliarden Bar und gut 15 Millionen Grad Celsius zu Helium. Unter diesen Bedingungen

liegt die Materie als Plasma vor, das heißt, Elektronen und positiv geladene Atomkerne sind nicht mehr aneinander gebunden. Die hohe Temperatur gibt den positiv geladenen Kernen die nötige Geschwindigkeit, um die abstoßende elektrostatische Kraft untereinander zu überwinden. Der Druck in der Sonne verdichtet die Materie außerdem so stark, dass das Aufeinandertreffen zweier Atomkerne wahrscheinlicher wird. Technisch kann dieser Druck auf der Erde nicht

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die Kernfusion könnte praktisch unendlich saubere Energie liefern und wird daher in einigen staatlichen Großforschungsprojekten wie Iter, Asdex Upgrade und Wendelstein 7-X sowie zahlreichen Start-up-Unternehmen erforscht.

Iter soll mehr Energie liefern, als direkt in den Start der Kernfusion fließt, verzögert sich aber immer wieder. Für den Betrieb benötigt aber auch Iter mehr Energie, als die Kernfusion erzeugt, und produziert keinen Strom. Das soll erst das Kraftwerk Demo schaffen.

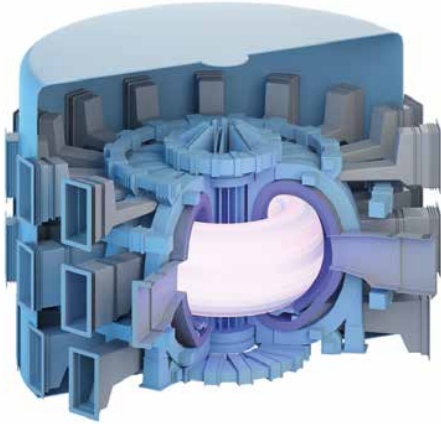
Die privaten Initiativen verkünden teilweise sehr ambitionierte Zeitpläne, die mit Skepsis betrachtet werden müssen. Oft bieten sie für ein Problem der Kernfusion eine sehr gute Lösung, für andere jedoch keine ausreichende.

erreicht werden, weshalb in den Fusionsreaktoren weitaus höhere Temperaturen nötig sind, um Atomkerne zur Fusion zu bewegen. Zudem fusionieren gewöhnliche Wasserstoffatome viel zu langsam für eine technische Nutzung. Doch bereits vor mehr als sieben Jahren fand die Physik eine prinzipiell technisch machbare Lösung: die Fusion von schwerem und überschwerem Wasserstoff – auch bekannt als Deuterium und Tritium.

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik erforscht zwei der ältesten Konzepte eines Fusionsreaktors. Am Standort in Garching experimentieren Forschende mit dem Asdex Upgrade, der wie Iter ein Tokamak ist. Ein Tokamak ist ein donutförmiges Gefäß, in dem ein starkes Magnetfeld die elektrisch geladenen Teilchen des Plasmas einschließt. Am Standort in Greifswald wird hingegen am Reaktor Wendelstein 7-X getüftelt, einem Stellarator. Auch der Stellarator bündelt das Plasma in einem ringförmigen Gefäß per Magnetfeld. Allerdings ähneln sein Plasmagefäß und sein Magnetfeld eher einer mehrfach in sich verdrehten Teigschlinge als einem glatten Donut.

In beiden Reaktortypen geht es zunächst darum, ein Wasserstoffplasma mit dem Magnetfeld so einzufangen, dass die geladenen Teilchen die Wand möglichst nicht berühren. Kommt das Plasma zu stark in Kontakt mit dem Gefäß, kühlt es zu sehr aus und eine sich selbst erhaltende Fusionsreaktion wird unmöglich. Zwar ist die Geometrie des Magnetfeldes im Tokamak einfacher als im Stellarator, im Tokamak muss aber Strom durch den Plasmaring fließen, was einige praktische Probleme für einen effizienten Kraftwerksbetrieb schafft. Die gäbe es im Stellarator nicht. „Vom Konzept her ist der Stellarator für ein Fusionskraftwerk besser geeignet“, erklärt Günter. „Allerdings muss das Magnetfeld eines Stellarators optimiert werden, was nur mit ausreichender physikalischer Kenntnis und Rechenleistung möglich ist. Daher hat die Fusionsforschung zunächst den einfacheren Tokamakansatz verfolgt.“ Auch Demo ist momentan als Tokamak geplant. Sollte sich bis zum Baubeginn allerdings herausstellen, dass das Stellaratorkonzept überlegen ist, könnten diese Pläne noch umgeworfen werden. Dass am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik sowohl Stellarator als auch Tokamak erforscht werden, ist weltweit einzigartig für eine Forschungseinrichtung. Das ermöglicht die in der Grundlagenforschung wichtige Objektivität, so Sibylle Günter: „Wir sind nicht festgelegt und





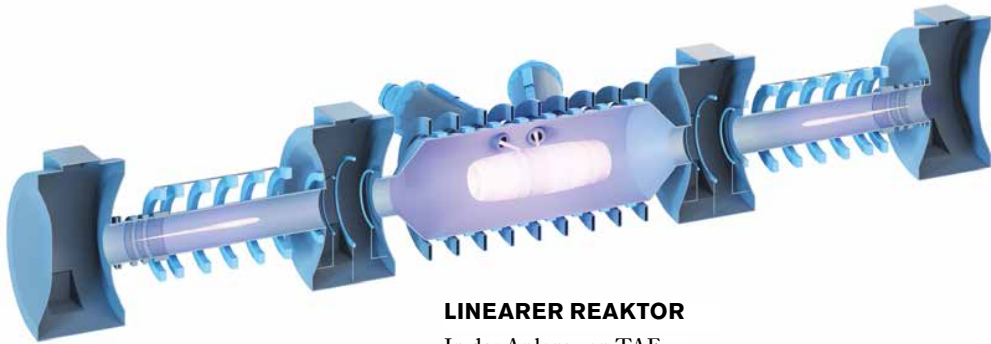
TOKAMAK

Die Plasmakammer von Asdex Upgrade, Iter und möglicherweise Demo hat die Form eines Donuts.



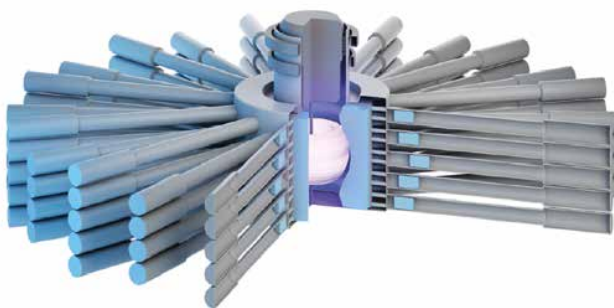
STELLARATOR

Ein gewundenes Magnetfeld schließt das Plasma im ebenso geformten Plasmagefäß etwa von Wendelstein 7-X ein.



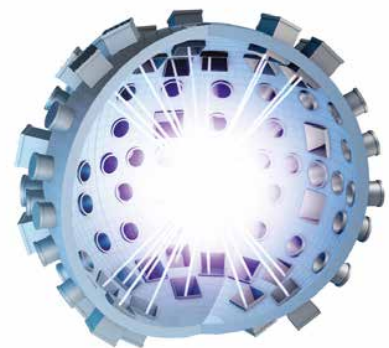
LINEARER REAKTOR

In der Anlage von TAE werden zwei Plasmapakete aufeinandergeschossen und erzeugen ein rotierendes zylindrisches Plasma.



MODIFIZIERTER TOKAMAK

General Fusion erzeugt ein Plasma in einem Behälter aus rotierendem flüssigem Metall, das zur Zündung mit Kolben komprimiert wird.



TRÄGHEITSFUSION

Die NIF und einige Start-ups nutzen die Trägheit von Masse aus, die ein Plasma zusammenhält, nachdem dieses mit starken Lasern verdichtet und erhitzt wurde.

ILLUSTRATION: P. BALL, THE RACE TO FUSION ENERGY, NATURE, VOLUME 599, ISSUE 7886, 25 NOVEMBER 2021; TRÄGHEITSFUSION: GCO

können die Vor- und Nachteile vergleichen und offen diskutieren. Zudem befruchtet sich die Forschung an beiden Anlagentypen gegenseitig.“

Kleiner Tokamak mit starken Magneten

Um in beiden Reaktortypen die nötige Temperatur für die Fusion zu erreichen, wird das Wasserstoffplasma durch den Einschuss schneller Wasserstoffatome, durch elektromagnetische Strahlung und, im Fall des Tokamak, durch Strom geheizt. Stimmen die Bedingungen schließlich, verschmelzen die Kerne von Deuterium und Tritium, und es entstehen ein Heliumkern und ein Neutron, beide mit beträchtlicher Bewegungsenergie. Für das ungeladene Neutron ist der Magnetkäfig durchlässig, sodass das Teilchen mit voller Wucht in die Gefäßwand eindringt. Die dabei entstehende Wärme soll wie in einem konventionellen Kraftwerk zur Stromerzeugung genutzt werden. Allerdings bleibt das Wandmaterial dabei als leicht radioaktiver Abfall zurück.

66

Unter den Start-ups setzt auch Commonwealth Fusion Systems auf das Tokamakdesign. Das Unternehmen kündigte sogar an, dass der Prototyp Sparc bereits in fünf Jahren funktionsfähig sein soll. Gelingen soll das mit einem im Vergleich zu Iter viel kleineren Tokamak, an dem sich schneller und kostengünstiger die nötigen Änderungen für einen marktreifen Reaktor vornehmen lassen. Um darin das Plasma einzuschließen, sind viel stärkere Magnetfelder nötig. Herzstück von Sparc sind daher neuartige Magnetspulen aus Hochtemperatur-Supraleitern, die leistungsfähiger als die supraleitenden Spulen von Iter sind und weniger stark gekühlt werden müssen. Die Technik wurde lange Zeit am MIT in Cambridge, Massachusetts, erforscht, woraus das Start-up hervorging. „Ich bin froh, dass Commonwealth Fusion Systems den Hochfeldansatz weiterverfolgt“, sagt Karl Lackner: „Die Erfolgsaussichten sind gut, denn das grundlegende

Prinzip ist lange erprobt. Allerdings lehrt uns die Erfahrung, beim angekündigten Zeitplan skeptisch zu sein.“ Immerhin konnte Commonwealth Fusion Systems auch private Investoren von seiner Idee überzeugen: Im vergangenen Jahr warb das Start-up mehr als 1,8 Milliarden US-Dollar ein.

Mit Google hat auch das Fusions-Start-up TAE Technologies starke Unterstützung im Rücken, und das nicht nur finanziell. Denn Google hilft auch mit Rechenleistung und Fachwissen auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz. „TAE verfolgt einen alten Ansatz, der erst durch die Nutzung fortgeschrittener Feedbacktechniken wieder attraktiv geworden ist“, erklärt Karl Lackner. TAE erzeugt durch eine Kombination aus Teilchenbeschleunigern und Magnetspulen einen Plasmazylinder, der etwa die Form einer Blechdose ohne Deckel und Boden hat. Der Zylinder dreht sich wie eine Walze, wodurch er stabilisiert wird – allerdings nur vorübergehend. Ohne weiteres Zutun würde die Rotation immer langsamer und der Plasmazylinder letztlich kollabieren. Erst dank aufwendiger Berechnungen mit der Unterstützung von Google konnte TAE die Instabilitäten verstehen und in Feedbackschleifen kontrollieren. Dieser Fortschritt beeindruckt Karl Lackner, doch er ist auch kritisch: „TAE steht beim Tripelprodukt, also der Kombination aus Temperatur, Teilchendichte und Einschlusszeit, heute da, wo die Forschung an Tokamaks in den 1970er- und 1980er-Jahren stand, hat aber vor allem noch eine viel zu geringe Teilchendichte.“ Das Tripelprodukt ist ein Maßstab dafür, wie nah das Plasma den Bedingungen für eine sich selbst erhaltende Kernfusion kommt. TAE erreichte dabei im Jahr 2019 noch nicht den Wert, welchen der Vorgänger von Asdex Upgrade am Max-Planck-Institut für Plasma-Physik bereits 1989 erzielte. Zudem strebt TAE wie einige wenige andere Unternehmen die Verschmelzung nicht von Tritium und Deuterium an, sondern von Bor und Protonen. So würde kein radioaktives und schwer

zu beschaffendes Tritium gebraucht, und es bliebe keine radioaktive Reaktorwand zurück. „Allerdings ist die Fusion von Bor und Proton wesentlich schwerer zu erreichen, und auch die Ausbeute ist geringer“, sagt Karl Lackner.

Während für TAE theoretische Berechnungen den Fortschritt brachten, soll bei General Fusion präzise Ingenieurskunst zum Durchbruch führen. Im herkömmlichen Tokamak und im Stellarator ist die Wechselwirkung zwischen Reaktorwand und Plasma problematisch. So sucht die Fusionsforschung seit Jahren intensiv nach den richtigen Materialien für die Reaktor-

Typisch Großbaustelle:
Im französischen Forschungszentrum Cadarache entsteht der Fusionsreaktor Iter – dabei kommt es immer wieder zu Verzögerungen. Durch die schleifenförmigen Elemente wird am Ende die Plasmakammer laufen.

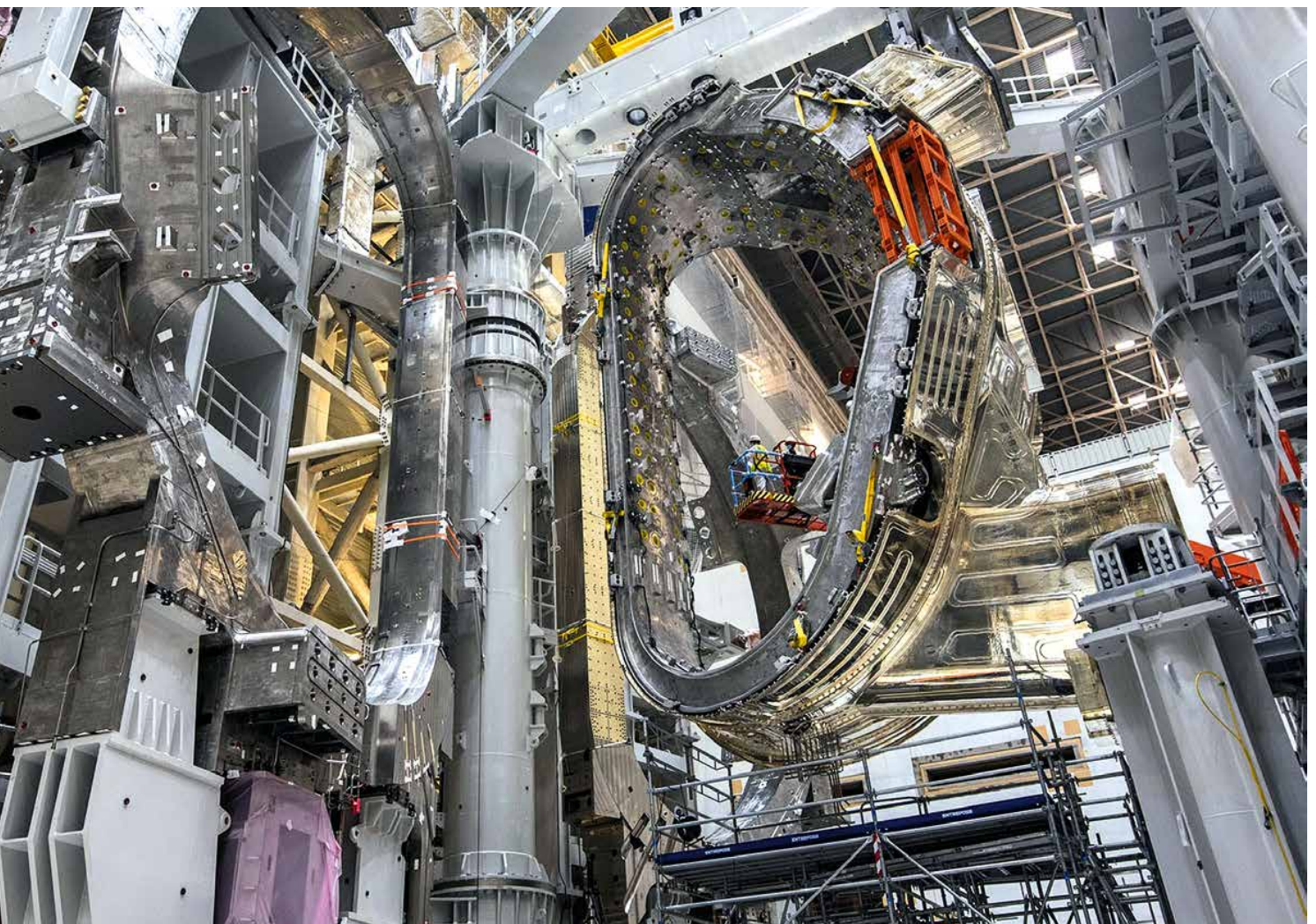


wand. General Fusion geht hier einen anderen Weg als die Mainstream-Forschung: Das Plasma soll durch flüssiges Metall eingeschlossen werden. Dieses wird durch die Wechselwirkung mit dem Plasma nicht zerstört und muss daher nicht immer wieder ausgetauscht werden. Zudem erleichtert es die Wand aus flüssigem Metall, die Fusionsenergie in Form von Wärme abzuführen. Beim Reaktordesign setzt General Fusion auf einen modifizierten Tokamak. Das flüssige Metall wird dazu im Reaktor zum Rotieren gebracht. Wie Wäsche beim Schleudern wird es dabei an die Wand des Gefäßes gedrückt, sodass in der Mitte ein Hohlraum entsteht.

In diesen Hohlraum soll das Plasma aus Deuterium und Tritium eingebracht werden. Um das Plasma zu zünden, das heißt: die Kernfusion zu starten, muss es allerdings weiter komprimiert werden. Dafür will General Fusion genau gesteuerte Kolben nutzen, die rundherum in der Reaktorwand angebracht sind und das flüssige Metall mit seinem Plasmakern zusammenpressen. Doch hier sieht Lackner auch eine der größten Herausforderungen: „Das komprimierte Plasma wird voraussichtlich instabil sein.“ Trotzdem gab General Fusion bekannt, dass es in Zusammenarbeit mit der United Kingdom Atomic Energy Authority ein De-

monstrationskraftwerk im englischen Culham bauen wird. Dieses soll schon 2025 fertiggestellt sein und den Weg zu ersten kommerziellen Fusionskraftwerken Ende der 2020er- oder Anfang der 2030er-Jahre ebnen.

Allen bisher genannten Projekten ist gemeinsam, dass bei ihnen ein Magnetfeld das Plasma einschließt. Einen völlig anderen Weg verfolgen etwa die staatliche Forschungseinrichtung National Ignition Facility (NIF) der USA sowie die deutschen Start-ups Marvel Fusion und Focused Energy. Sie setzen auf die laserbasierte Trägheitsfusion. Dabei werden die Bedingungen für die Kernfusion nur für



67

FOTO: ITER ORGANIZATION, HTTP://WWW.ITER.ORG/

Mit Lichtleistung zur Trägheitsfusion: An der National Ignition Facility in den USA wird der aktuell stärkste Laser der Welt in mehrere Strahlen geteilt, welche in der Reaktorkammer Röntgenstrahlung erzeugen. Diese bringt eine Kapsel mit Deuterium und Tritium zur Explosion, sodass ein Plasma entsteht und es zur Kernfusion kommt.



68

sehr kurze Zeit erreicht, üblicherweise für einige Nanosekunden. Das Plasma hält für diese kurze Zeit schon alleine aufgrund der Masseträgheit zusammen und muss nicht aufwendig in einen Magnetkäfig gesperrt werden. Um die hohe Temperatur und die nötige Dichte für die Kernfusion innerhalb kürzester Zeit zu erreichen, setzen die Forschenden auf leistungsstarke Laser. Die NIF am Lawrence Livermore National Laboratory ist vor allem eine militärische Forschungseinrichtung, denn an der laserbasierten Trägheitsfusion lässt sich studieren, was bei der Zündung einer Was-

serstoffbombe passiert. Die dortige Anlage ist trotzdem – oder gerade deswegen – das am weitesten entwickelte System zur Trägheitsfusion. So kann die NIF den derzeit stärksten Laser der Welt nutzen. Seine Energie erzeugt indirekt, also über mehrere Zwischenschritte, die Kombination von hoher Temperatur und Dichte, die ein Plasma zündet. Im Dezember 2022 gelang den Forschenden der NIF ein Rekordschuss: Die Kernfusion setzte etwa 50 Prozent mehr Energie frei, als der Laser einbrachte, um das Plasma zu erzeugen und zu zünden. Ähnliche Erfolge konnte das

Team in der Vergangenheit allerdings nur mit Mühe reproduzieren, da unter anderem kleinste Abweichungen in der Geometrie des Experiments bereits zu großen Unterschieden im Ergebnis führen. Von einem Kraftwerk ist der Ansatz ohnehin weit entfernt: Die Anlage des NIF kann aktuell nur vier bis sechs Schüsse pro Tag abfeuern, für ein Kraftwerk müssten es mehrere pro Sekunde sein.

Im Unterschied zur NIF zielen die beiden deutschen Start-ups mit ultrakurzen Laserpulsen direkt auf eine Kapsel mit dem Brennstoff. Focused

KERNFUSION

heißt die Verschmelzung von Atomkernen. Handelt es sich um leichte Kerne wie Protonen, wird dabei Energie frei; Sterne erzeugen auf diese Weise Energie.

MAGNETEINSCHLUSS

heißt ein Ansatz der Kernfusion, bei dem ein Plasma in einem Magnetfeld eingeschlossen wird.

Dies geschieht vor allem in Tokamak- und Stellaratoranlagen, die sich in der Erzeugung des Magnetfelds unterscheiden.

TRÄGHEITSFUSION

bedeutet, dass das Fusionsplasma aufgrund der Masseträgheit die nötige Dichte kurzzeitig behält. Laser können das Plasma erzeugen, verdichten und heizen.



FOTO: LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

siv nennt. Bei der lasergestützten Trägheitsfusion von Marvel Fusion soll der besondere Kniff sein, dass die Kapseln mit dem Brennstoff eine besondere Nanostruktur aufweisen. Allerdings sind nur wenige wissenschaftliche Details des Ansatzes öffentlich, entsprechend skeptisch zeigen sich Günter und Lackner. „Anhand der öffentlich zugänglichen Informationen ist nicht ersichtlich, wie der Ansatz von Marvel Fusion funktionieren soll“, konstatiert Lackner.

Probleme macht die Energiebilanz

Ein Problem plagt alle derzeit verfolgten Ansätze: Bisher sind die Fusionsreaktoren weit davon entfernt, mehr Energie zu erzeugen, als für den gesamten Betrieb notwendig ist. Für die Nutzung der Kernfusion in Kraftwerken ist schließlich nicht die Energiebilanz der Fusionsreaktion entscheidend, sondern die Nettoenergieausbeute des ganzen Kraftwerks. Selbst Iter wird da keine schwarzen Zahlen erreichen. Zwar soll er mehr Energie erzeugen, als direkt in das Plasma fließt. Trotzdem würde Iter als Kraftwerk insgesamt mehr Energie verbrauchen, als er erzeugt. Denn vor allem die Kühlung der großen Magnetspulen sowie die Heizung des Plasmas verschlingen enorme Energiemengen. Zudem lässt sich die durch die Kernfusion generierte Wärme nicht verlustfrei in Strom umwandeln. Vermutlich könnte Iter theoretisch circa die Hälfte des eigenen Energiebedarfs decken. Bei der Trägheitsfusion ist der Unterschied noch gewaltiger: Beim jüngsten und bisher besten Versuch der laserbasierten Trägheitsfusion in der NIF wurden 150 Prozent der Laserenergie durch Kernfusion wieder frei. Doch für die Erzeugung der Laserenergie war etwa 150-mal mehr Energie notwendig, als in der Reaktorkammer ankam. Somit setzte die Kernfusion etwa ein Prozent der eingesetzten Energie als Wärme frei. Davon könnten allenfalls etwa 50 Prozent in Strom umgewandelt werden.

Energy, eine Ausgründung der TU Darmstadt, erzeugt und verdichtet ein Plasma zunächst, indem ein mit Deuterium und Tritium gefülltes Kügelchen mit einem Laserstrahl beschossen wird. Ein Ionenstrahl zündet das Plasma dann. Dadurch lässt sich der Aufwand für einen extrem leistungsfähigen Laser vermeiden, was Kosten spart. „Ein spannender Ansatz – wenn er funktioniert“, sagt Sibylle Günter. „Und beim Zeitplan bin ich kritisch.“ Denn schon Mitte der 2030er-Jahre sollen erste Kraftwerke Strom produzieren, ein Plan, den selbst das Unternehmen aggress-

Das Pilotkraftwerk Demo soll jedoch beweisen, dass zumindest die Kernfusion per Magneteinschluss auch alles in allem Energie produzieren kann, wenn die Anlage nur groß genug ist. Doch selbst wenn Forschungsgruppen irgendwann eine sich selbst erhaltende Fusionsreaktion mit positiver Energiebilanz bewerkstelligen, wird sich noch zeigen müssen, ob diese Art der Stromerzeugung wirtschaftlich ist.

Trotz aller Schwierigkeiten bleibt ein Fusionskraftwerk ein erstrebenswertes Ziel. Denn die Probleme fossiler Brennstoffe sind hinlänglich bekannt, und ob erneuerbare Quellen wie Wind und Sonne in der Praxis den wachsenden Energiebedarf der Menschheit decken können, ist noch offen. Welcher der zahlreichen Ansätze zur Kernfusion am Ende erfolgreich sein wird, ist schwer abzusehen. Klar ist allerdings, dass die Konkurrenz den wissenschaftlichen Austausch nicht unterdrücken sollte: „Ob nun durch staatliche Forschung oder privatwirtschaftliche Initiative – wichtig ist, dass die Ergebnisse offen kommuniziert werden“, sagt Karl Lackner. „Auf diese Weise kommen wir auf jeden Fall schneller ans Ziel.“



Am Rande der Welt: Der 800-Seelen-Ort Kangiqsujuaq liegt abgeschieden im äußersten Norden Quebecs. Für die Inuit, die dort leben, sind die Jagd und das Teilen von Lebensmitteln auch heute noch wichtig.

70

Max-Planck-Forschende kooperieren mit Partnern in mehr als 120 Ländern. Hier schreiben sie über ihre persönlichen Erfahrungen und Eindrücke. Elspeth Ready vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig reist für ihre Studien regelmäßig in die kanadische Arktis. Sie erzählt von grandioser Weite, besonderen kulinarischen Genüssen und von einer eisigen Fahrt auf dem Hundeschlitten.

Das Dorf Kangiqsujuaq hat 800 Einwohner und liegt in der Region Nunavik im äußersten Norden Quebecs. Von Montreal aus fliegt man zuerst nach Kuujuaq. Dort steigt man in ein kleineres Flugzeug um, das verschiedene Küstenorte entlang der Hudson Strait ansteuert. Die Reise von Kuujuaq aus dauert normalerweise einen halben Tag. Man muss allerdings Ge-

duld mitbringen und flexibel sein, denn oft werden Flüge wegen schlechten Wetters verschoben – manchmal um mehrere Tage.

Im Jahr 2011 war ich zum ersten Mal in Kangiqsujuaq, gemeinsam mit einem Team von Archäologen. Wir arbeiteten damals an der Dokumentation von halb unterirdischen Häusern, wenige Kilometer vom heutigen Dorf entfernt. Sie waren jahrhundertlang sowohl von Inuit bewohnt worden als auch von Tuniiit – einer Bevölkerungsgruppe, die vor der Ankunft der Inuit in der Region lebte. Nach diesem ersten Sommer kehrte ich immer wieder nach Kangiqsujuaq zurück. Motiviert durch meine Erfahrungen und die Gespräche mit Jägern, entwickelte ich ein Forschungsprojekt, um herauszufinden, welche Rolle die Jagd und die gemeinsame Nutzung von Lebensmitteln für die Ernährungssicherheit in Inuit-Gemeinschaften spielen.

In den vergangenen hundert Jahren haben die Inuit extreme Veränderungen erlebt: Viele Ältere wurden in Iglus

oder Zelten geboren und lebten auf dem Land, bis sie in den 1960er-Jahren von der Regierung aufgefordert wurden, ins Dorf zu ziehen. Heute wohnen die Inuit in festen Häusern und kaufen Lebensmittel und Dinge des täglichen Bedarfs in Geschäften. Die eigene Sprache und kulturelle Praktiken wie die Jagd und das Teilen von Lebensmitteln haben noch immer einen hohen Stellenwert. Trotzdem war der Umbruch nicht leicht. In einem meiner aktuellen Projekte geht es um Stress und um Strategien zur Stressbewältigung. Dabei arbeite ich mit dem Gemeinderat vor Ort zusammen.

Bei meinem letzten Aufenthalt in Kangiqsujuaq konnte ich eine kleine Lehrerwohnung nutzen, die in den Schulferien frei war. Vormittags schreibe ich normalerweise Feldnotizen, am Nachmittag führe ich Interviews. Am Abend besuche ich oft meine Freunde im Dorf. Die Inuit servieren Besuchern gerne lokale Spezialitäten wie Karibu, Robbe, Belugawal, Gans oder Schneehuhn. Mein persönlicher Fa-



KANGIQSUJUAQ, KANADA

vorit ist der Seesaibling. Er schmeckt so ähnlich wie Lachs, aber viel besser! Getrocknet und mit Montreal-Steakgewürz mag ich ihn ganz besonders.

Traditionelle Lebensmittel sind für die Inuit heute eine wichtige Quelle für Nährstoffe und Vitamine. Frische Lebensmittel gibt es nur selten in den Supermärkten in Kangiqsujuaq. Reis, Nudeln und andere nicht verderbliche Waren werden im Sommer per Frachtschiff angeliefert. Eine Auswahl von frischem Obst und Gemüse kommt wöchentlich mit dem Flugzeug, ist aber schnell vergriffen und sehr teuer. Traditionelle Lebensmittel werden weithin geteilt, und dieses Teilen bringt die Familien und die Gemeinschaft näher zusammen. Um so viel wie möglich über den Nahrungserwerb zu lernen, nehme ich an Jagd- und Angelausflügen teil, sooft sich die Gelegenheit bietet. Ich bin in der Lage, ein Schneemobil zu steuern, und helfe, wo ich kann – etwa beim Zerlegen eines Wals. In der arktischen Landschaft unterwegs zu sein, ist für

mich ein erhebendes Gefühl. Die Weite und Freiheit sind unbeschreiblich. In Deutschland werde ich oft gefragt, wie ich mit der Dunkelheit des arktischen Winters zurechtkomme, aber ich bin in Kanada aufgewachsen und war daher schon als Kind gewöhnt, im Dunkeln zur Schule zu gehen und nach Hause zu kommen. Den deutschen Winter empfinde ich oft als viel bedrückender – grau in grau und wolkenverhangen. In der Arktis ist der Himmel meist klar, und man sieht den Mond und die Sterne. Der Schnee macht alles hell.

Einmal habe ich mit Freunden eine Hundeschlittentour unternommen. Sieben Stunden lang fuhren wir über die verschneite Tundra und das Meeris bis zu einer kleinen Hütte, wo wir die Nacht verbrachten. Am nächsten Tag ging es wieder zurück. Während der mehrstündigen Schlittenfahrt bei minus 25 Grad Celsius habe ich mir eine Erfrierung an der Nase zugezogen. Meine Inuit-Begleiter haben es zum Glück rechtzeitig bemerkt, und daher ist alles wieder gut verheilt!



FOTO: PRIVAT

Elspeth Ready

36, ist Kanadierin und studierte Anthropologie an der University of Alberta und der Trent University. Nach ihrer Promotion an der Stanford University wechselte sie Anfang 2019 ans Leipziger Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie. Gemeinsam mit ihrem Team untersucht sie, wie traditionelle Lebensmittel in Inuit-Gemeinschaften die Ernährungssicherheit, das Wohlbefinden und auch die Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Klimawandel fördern.



DIE VERFOLGTEN

THOMAS BÜHRKE



Geniale und geächtete
Wissenschaftler
von Giordano Bruno
bis Alan Turing

GENIAL UND GEÄCHTET

Was verbindet Giordano Bruno, Emmy Noether, Albert Einstein und Alan Turing? Alle waren sie herausragende Forscherinnen und Forscher – und alle ereilte sie ein ähnliches Schicksal: Sie wurden diffamiert, verfolgt, vertrieben oder gar ermordet. Diesen Genialen und Geächteten widmet der Autor und Journalist Thomas Bührke sein neuestes Buch. Darin zeichnet er die Lebenswege von sechs Wissenschaftlern und zwei Wissenschaftlerinnen nach, entwirft aber auch ein erhellendes Bild der jeweiligen gesellschaftlichen und politischen Umstände ihrer Zeit. Der 1548 geborene Pries-

ter, Philosoph und Astronom Giordano Bruno etwa hatte unter anderem postuliert, das Universum sei unendlich und die Sterne am Firmament seien fremde Sonnen, umkreist von unzähligen Planeten. Bruno starb im Jahr 1600 auf dem Scheiterhaufen. Um ihr Leben fürchten mussten mehr als 330 Jahre später die Mathematikerin Emmy Noether und der damals schon berühmte Physiker Albert Einstein, die beide letztlich dem Naziregime entfliehen konnten. Und auch nach dieser finsternen Zeit geschah bedeutenden Forschern noch großes Unrecht. Tragisch ist der Fall des britischen Computerex-

perten Alan Turing, dem es gelang, die Verschlüsselungsmaschine Enigma zu knacken. Er musste sich wegen seiner Homosexualität einer Hormonbehandlung unterziehen und nahm sich 1954 das Leben. In seinem lesenswerten Buch beleuchtet Thomas Bührke die Biografien all dieser Verfolgten – ebenso wie Wahn und Wahnsinn ihrer Verfolger.

Helmut Hornung

Thomas Bührke
Die Verfolgten
311 Seiten, Klett-Cotta
22,00 Euro

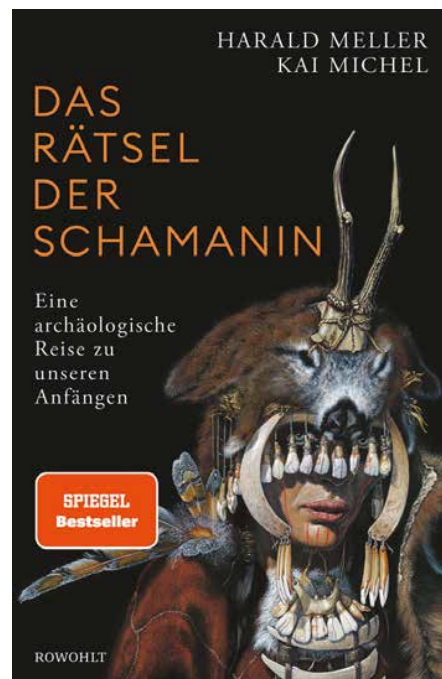
STEINZEIT-KULT

Ein Grab mit einer toten Frau und einem Kind. Dazu Rehgehörn, Schildkrötenpanzer, Igelknochen sowie Zähne von Auerochse, Eber und Wisent – der Fund im Kurpark einer Kleinstadt in Sachsen-Anhalt bietet reichlich Stoff für einen gruseligen Sonntagabendkrimi im Ersten. Nach der Himmelscheibe von Nebra haben sich der Journalist Kai Michel und der Archäologe Harald Meller einen weiteren Fall aus der Frühgeschichte Europas vorgenommen: die Schamanin von Bad Dürrenberg. Dabei erzählen die beiden Autoren viel über die Lebensumstände der Frau in der Mittelsteinzeit vor 9000 Jahren. Der spannende Erzählstil, die abwechslungsreiche Komposition des Buches und die beeindruckenden Illustrationen lassen die Schamanin beim Lesen vor dem inneren Auge lebendig werden. Zu Beginn des Buches beschäftigen sich Meller und Michel mit der bewegten Geschichte der außergewöhnlichen Frau nach ihrem Tod: von der Vereinnahmung durch die Nationalso-

zialisten im Dritten Reich bis zur aktuellen Deutung als Schamanin. Die Autoren stellen ausführlich dar, wie wenig die Realität der Schamanen in der Steinzeit mit unseren heutigen Vorstellungen davon gemein hat. Geschickt verweben sie das Wissen über das Leben in der Steinzeit mit neuen Erkenntnissen aus einer Nachgrabung an der Fundstelle und archäogenetischen Analysen von Forschenden des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie. Wie schon in ihren Büchern über die Himmelscheibe von Nebra erzählen die beiden Autoren so packend, dass man das Buch kaum weglegen möchte. Ein Archäologiekrimi, der sich das Spannendste bis zum Schluss aufhebt.

Harald Rösch

Harald Meller, Kai Michel
Das Rätsel der Schamanin
368 Seiten, Rowohlt
28,00 Euro



HARALD MELLER
KAI MICHEL

DAS RÄTSEL DER SCHAMANIN

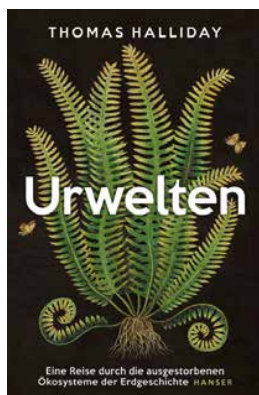
Eine archäologische
Reise zu
unseren
Anfängen

SPIEGEL
Bestseller

ROWOHLT

NEU

ERSCHIENEN



SAFARI IN DER ZEITMASCHINE

Hier ein Schädel, ein Zahn oder Knochen, dort ein Abdruck im Sediment – von Tieren und Pflanzen, die vor Jahrmillionen gelebt haben, ist heute meist nicht mehr viel übrig. Umso erstaunlicher ist es, dass wir uns anhand solcher Relikte ein Bild von längst vergangenen Ökosystemen machen können. Der Paläontologe und Evolutionsbiologe Thomas Halliday hat sich vorgenommen, dieses Bild mit Leben zu füllen: In sechzehn Kapiteln nimmt er seine Leserinnen und Leser mit auf eine Zeitreise durch mehr als fünfhundert Millionen Jahre Erdgeschichte und geht mit ihnen auf Safari: Vor rund 32 Millionen Jahren etwa streiften bodenbewohnende Faultiere durch die weiten Grasebenen Südamerikas. Einige Vertreter dieser einst artenreichen Tiergruppe eroberten in ihrer späteren Blütezeit sogar das Meer: Mit erhöht liegenden Nasenöffnungen und biberartigen Schwänzen wanderten sie im Flachwasser und ernährten sich dort von Seetang. Diese und andere erstaunliche Lebewesen beschreibt Halliday wissenschaftlich fundiert und lässt neben plastischen Schilderungen Informationen zu Evolution, Ökologie oder Geologie einfließen. Im Epilog schafft er eine Verbindung zur Gegenwart, die weitgehend vom Menschen geprägt ist. Darin zeigt er, dass der Blick auf die Vergangenheit keineswegs nur rückwärtsgewandt ist; vielmehr ermöglicht er es auch, sich mit der eigenen Zukunft auseinanderzusetzen.

Elke Maier

Thomas Halliday
Urwelten
464 Seiten, Carl Hanser Verlag
28,00 Euro

DIE FINSTERE SEITE DER BÄUME

Sonderbare, düstere, abseitige oder gar kriminelle Naturphänomene, Skurriles aus der Tier- und Pflanzenwelt: Das ist das Terrain, auf dem sich der Wiesbadener Autor, Journalist, Krimischreiber und Wissenschaftsredakteur Markus Bennemann besonders wohlfühlt. Jetzt ist sein Band *Böse Bäume* erschienen, in dem er sich mit der hinterhältigen, grausamen Seite der Natur befasst. Der Band ist ein Mix aus Wissenschaftsbuch und Unterhaltungsliteratur und ermöglicht dank eines umfassenden Quellenverzeichnisses auch einen wissenschaftlich weiterführenden Weg in das Thema. Eine spannende Lektüre ist das Ganze obendrein. Besonders die Kapitel über exotische Gewächse. Aber auch die heimischen Bäume sind nicht ohne, wie etwa der Walnussbaum, der ein Herbizid produziert, das andere Pflanzen töten kann. Oder Buchen, die ein dichtes Dach bilden, unter dem fast nichts gedeiht. Unter den Exoten ist die Würgefleige der auffälligste Übeltäter: Diese Baumart würgt mit ihren Luftwurzeln ihren Wirtsbaum gleichsam zu Tode. Eukalyptusbäume wiederum entfachen Brände, um sich lästige Kon-



kurrenten vom Hals zu schaffen. Oder der Australische Weihnachtsbaum: Er kappt anderen Bäumen die Wurzeln. Auch wenn Bäume böse sein können: Bennemann liebt die Natur, das spürt man auf jeder Seite. Wenn er ein Baum sein müsste, sagt der Autor, dann wäre er gerne die obere, die „gute“ Seite des Australischen Weihnachtsbaums: Wunderschöne Blüten wachsen da; und den Aborigines gilt dieser Ort als eine Art Rastplatz für die Seelen ihrer Ahnen.

Marc Peschke

Markus Bennemann
Böse Bäume
272 Seiten, Goldmann Verlag
18,00 Euro

73



ILLUSTRATION: SOPHIE KETTERER FÜR MPG

FÜNF FRAGEN

ZU NEUEN DIGITALEN KOMPETENZEN

AN ANASTASIA KOZYREVA

Forschende aus Berlin, Stanford und Bristol haben „kritisches Ignorieren“ als neue Methode erarbeitet, mit der man mehr Kontrolle über die eigene Online-Mediennutzung gewinnen kann.

Frau Kozyreva, Sie waren Teil des Teams. Warum verbringen wir überhaupt so viel Zeit mit Online-nachrichten?

ANASTASIA KOZYREVA Für uns Menschen ist es seit jeher lebenswichtig, Informationen aus unserer Gemeinschaft zu bekommen und weiterzugeben. Negative oder auch sehr emotionale Neuigkeiten wecken unsere Aufmerksamkeit besonders, weil sie uns zum Beispiel vor potenziellen Gefahren warnen. Das hat jahrtausendlang gut funktioniert. Aber seit wenigen Jahren überfluten uns Onlinemedien geradezu mit Nachrichten. Sie sind so gestaltet, dass wir möglichst viel Zeit dort verbringen, damit die Anbieter möglichst viel Werbung schalten können. Wir hatten keine Möglichkeit, uns daran anzupassen. Deswegen brauchen wir neue digitale Kompetenzen. Meine Kollegen und ich halten kritisches Ignorieren im Umgang mit Onlinemedien für genauso wichtig wie kritisches Denken.

Wie funktioniert kritisches Ignorieren?

Dazu kann man drei Strategien anwenden. Die erste ist *self nudging*. Das heißt, ich gestalte meine Umgebung so, dass ich kontrol-

lieren kann, worauf ich mich wirklich einlasse. Wir können und sollten aktiv entscheiden, wie viel Zeit wir mit den Smartphones, Tablets oder am Computer verbringen wollen. Das lässt sich umsetzen, indem man auf den Geräten zum Beispiel Zeitlimits einrichtet oder sich erinnern lässt, das Handy abends ab einem bestimmten Zeitpunkt wegzulegen. So bleibt mehr Zeit für Offlineaktivitäten, die das Leben wirklich lebenswert machen – zum Beispiel Zeit mit Familie und Freunden.

In der Zeit, in der ich online bin, erreichen mich allerdings schon ziemlich viele Nachrichten. Wie kann ich herausfinden, welche davon Fake News sind?

Auch da gibt es eine Strategie, nämlich *lateral reading*, seitwärts lesen. Wir haben in der Schule gelernt, einen Text kritisch zu prüfen, indem man ihn von oben bis unten genau durchgeht. Faktenchecker machen das anders: Sie öffnen im Browser einen weiteren Tab – also seitwärts – und googeln, wer hinter einer Webseite steckt. Es gibt erstaunlich viele Seiten, die sehr seriös wirken, aber von Interessengruppen zum Beispiel aus der Wirtschaft stammen, die so die öffentliche Meinung beeinflussen wollen. Bei Quellen, die wir nicht zuordnen können – egal ob Webseiten, Videos oder weitergeleitete Posts –, sollten wir grundsätzlich misstrauisch sein. Mit *lateral reading* findet man häufig schon nach wenigen Minuten heraus, ob eine Information vertrauenswürdig ist.

Ein großes Problem in Chats oder sozialen Medien ist *hate speech*. Sollte ich eingreifen, wenn ich Beleidigungen, rassistische oder sexistische Kommentare lese?

Nein, auf keinen Fall! Denn genau das wollen die Leute erreichen, die so etwas verbreiten: Sie wollen provozieren und fühlen sich bestätigt, wenn sie darauf eine Reaktion kriegen. Es geht hier darum, uns selbst zu schützen: Wenn man sich auf Diskussionen mit solchen Leuten einlässt, kann das wirklich schädlich sein für die Psyche und für die Beziehungen zu anderen Menschen. Es ist besser, die Provokateure zu ignorieren, sie wenn möglich zu blocken und den Betreibern der Plattform zu melden.

Für wen haben Sie Ihre Empfehlungen entwickelt?

Das Thema geht uns wirklich alle an, egal ob jung oder alt. Besonders wichtig wäre, diese Strategien an Schulen zu vermitteln. Sie sind einfach zu lernen und sehr wirkungsvoll. Mit dem kritischen Ignorieren gibt man den jungen Leuten die Möglichkeit, ihre Aufmerksamkeit für Onlineinhalte bewusst und gezielt einzusetzen.

Interview: Mechthild Zimmermann

Anastasia Kozyreva arbeitet am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung im Forschungsbereich Adaptive Rationalität.

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

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

- Jupiter, Florida

Brasilien

- Manaus

Luxemburg

- Luxemburg



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)
 Mechthild Zimmermann (Kultur, Gesellschaft; -1720)

Redaktion
 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
 Schaezlerstraße 17
 86150 Augsburg
 www.gco-agentur.de

Druck & Vertrieb
 Vogel Druck & Medienservice GmbH
 Leibnizstraße 5
 97204 Höchberg

Anzeigenleitung
 Beatrice Rieck
 Vogel Druck & Medienservice GmbH
 Leibnizstraße 5
 97204 Höchberg
 0931 4600-2721
 beatrice.rieck@vogel-druck.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 englischer Sprache (MaxPlanckResearch) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr. Die Auflage dieser Ausgabe beträgt 80000 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 86 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 23900 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6900 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2021 umfasste insgesamt 2,0 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.

MAX PLANCK
GESELLSCHAFT

