

Ausgabe 01 | 2022

# MAX PLANCK

## *Forschung*

**MENSCHHEITSGESCHICHTE**

Ein uraltes Perlennetzwerk

**ENTWICKLUNGSBIOLOGIE**

Im Darm tobt das Leben

**NEUROWISSENSCHAFTEN**

Musik im Kopf



UNTER DRUCK



FOTO: JAN HOSAN

**D**ruckempfindlich: Mikhail Eremets und sein Team am Max-Planck-Institut für Chemie messen mit einem spektroskopischen Verfahren die immensen Drücke, die sie in der Diamantstempelzelle (Titelbild) erzeugen. In ihren Experimenten bringen sie wasserstoffreiche Materialien bei relativ moderaten Temperaturen in den supraleitenden Zustand.

# EDITORIAL

---

Liebe Leserin, lieber Leser

Druck ist ein vieldeutiges Wort. Vielleicht ist Stress im Alltag das Erste, was viele damit verbinden. Auch Gesellschaften können unter Druck geraten – ökonomisch, ökologisch, sozial oder politisch, im schlimmsten Fall sogar existenziell, wie es gerade in der Ukraine geschieht. In all diesen Fällen dient die physikalische Größe als Metapher für manchmal untragbare Belastungen.

Der psychosoziale Druck etwa, den wir als Stress erfahren, vermiest uns nicht nur das Leben, er schadet auch unserer Gesundheit. Welche genetischen Faktoren die menschlichen Stressreaktionen beeinflussen und welche Folgen Stress selbst schon vor der Geburt für den Körper haben kann, untersuchen Teams der Max-Planck-Institute für Psychiatrie und für Kognitions- und Neurowissenschaft.

3

Derartigen Druck nehmen wir selten als nützlich wahr. Das ist beim physikalischen Druck anders: Er ist für viele Prozesse unabdingbar, auch in der Biologie. So steuert Druck den permanenten Umbau von Knochen. Wie das geschieht und welche Meisterleistung Organismen dabei vollbringen, ist Thema von Forschenden am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, die oft selbst über ihre Ergebnisse staunen.

Zum Staunen sind auch die Durchbrüche, die eine Gruppe am Max-Planck-Institut für Chemie mit Druck erzielt. Drücke, wie sie im Erdinnern herrschen, helfen nämlich, den elektrischen Widerstand von Materialien zu brechen – und zwar erstmals bei beinahe praxistauglichen Temperaturen. Die Forschung an Supraleitern, mit denen seit dem 20. Jahrhundert viele bislang unerfüllte Hoffnungen verknüpft sind, erhält dadurch neue Impulse.

Von den vielen Facetten des Drucks haben wir einige aufgegriffen und in eine druckreife Form gebracht. Wir wünschen Ihnen damit ein erkenntnisreiches Lesevergnügen – entspannt und ohne Zeitdruck!

Ihr Redaktionsteam



38



46



62



68

FOTOS: DAVID AUSSERHOFER (LINKS OBEN), ANNA ZIEGLER (RECHTS OBEN), FELIX BERNOULLY (LINKS UNTEN), SCIENCE PHOTO LIBRARY (RECHTS UNTEN)

**38 | DYNAMISCH**

Unser Skelett gibt dem Körper Halt und ist dabei ständig im Umbau begriffen.

**46 | LOGISCH**

Christoph Weidenbach knackt komplexe mathematische Probleme.

**62 | MUSIKALISCH**

Harmonien zu genießen und auch zu erschaffen ist uns in die Wiege gelegt.

**68 | GENETISCH**

Stichlinge haben vom Meer aus vielfach neue Lebensräume im Süßwasser besiedelt.

## 03 | EDITORIAL

## 06 | ORTE DER FORSCHUNG

Ein Kindergarten in Bamako / Mali

## 08 | KURZ NOTIERT

## 16 | ZUR SACHE

### Die unerwartete Zukunft von Öl und Gas

Wenn die Energieerzeugung zunehmend ohne Erdöl und Erdgas auskommt, wird der Preis sinken. Damit gewinnen fossile Brennstoffe neu an Attraktivität. Die Suche nach alternativen Nutzungsmöglichkeiten sollte daher schon jetzt forciert werden.

## 22 | INFOGRAFIK

Ein uraltes Perlennetzwerk

## IM FOKUS

Unter Druck

### 24 | Wasserstoff in leitender Funktion

Mit einem neuen Ansatz sind Forschende der Supraleitung bei praxistauglichen Temperaturen viel näher gekommen – nicht zuletzt, indem sie ihre Materialien unter geradezu astronomischen Druck setzen.

### 32 | Stress lass nach

Die Stressreaktion des menschlichen Körpers ist eine Art Notfallprotokoll aus der Steinzeit. Zu unserer heutigen Lebensweise passt sie nur bedingt. Was aber passiert bei Stress im Körper eigentlich? Warum sind manche Menschen besonders anfällig?

### 38 | Knochenarbeit

In unserem Körper werden ständig Knochen erneuert und bei mechanischer Belastung umgebaut. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler untersuchen, was dabei genau geschieht und welche Struktur die Knochen steif und fest macht.

## 46 | BESUCH BEI

Christoph Weidenbach

## 54 | ZWEITER BLICK

## WISSEN AUS

### 56 | Im Darm tobt das Leben

Bakterien sind fast überall – auch in unserem Darm. Ohne sie könnten wir etwa die Nahrung nicht so effektiv verdauen. Wie aber haben Mikroben die Evolution des Menschen beeinflusst?

### 62 | Musik im Kopf

Das menschliche Gehirn ist dafür geschaffen, Musik sowohl zu genießen als auch zu produzieren. Forschende untersuchen, was genau im Kopf beim Musizieren geschieht.

### 68 | Ein Fisch – mit allen Wassern gewaschen

Dreistachlige Stichlinge leben im Salz- wie auch im Süßwasser. Wie hat sich das Genom der Fische im Zuge der Anpassung verändert? 12 000 Jahre alte Stichlingsknochen liefern Einblicke in die Frühphase dieses Wandels.

## 74 | POST AUS ...

Kapverden

## 76 | NEU ERSCIENEN

## 78 | FÜNF FRAGEN

Zu neuen EU-Regeln für Internetkonzerne

## 79 | IMPRESSUM

5

## BIOMAX

Virtueller Blick in alte Knochen – dem Leben unserer Urnahmen auf der Spur



**E**in Kindergarten in einem Gemeindezentrum in Bamako, der Hauptstadt von Mali: Dort, wo sonst Kinder toben und spielen, geht es an diesem Tag um Rhythmusgefühl, informelles Lernen und auch um kulturelle Klischees.

6

Rainer Polak und Nori Jacoby vom Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik haben den Raum angemietet, um traditionellen Tanz und Musik in Westafrika zu erforschen. Dazu haben sie mehrere Gruppen lokaler Profikünstlerinnen und -künstler engagiert. Beteiligt sind ein Trommelensemble mit drei Musikern, zwei Sängerinnen und mehrere Tänzerinnen. Bei der Livesession werden alle Aspekte der Darbietung multimedial erfasst. Videokameras nehmen die Aufführung aus mehreren Perspektiven auf, und alle Instrumente sind mit Tonabnehmern ausgestattet, welche die mechanischen Schwingungen der Trommelmembran direkt auffangen. Eine der Tänzerinnen trägt einen Motion-Capture-Anzug, in den siebzehn Sensoren eingearbeitet sind, von denen jeder gleichzeitig Beschleunigungs-, Rotations- und Magnetfeldwerte erfasst. Daraus lässt sich die Bewegung der Tänzerin im Raum exakt berechnen und beispielsweise mit den Rhythmen der Instrumentalmusiker in Beziehung setzen.

Die Frankfurter Wissenschaftler erheben solche und andere Daten regelmäßig in Mali und Bolivien sowie zum Vergleich auch in Deutschland, Bulgarien, den USA, Großbritannien und Uruguay. Ergebnis: Menschen aus unterschiedlichen Kulturen nehmen dieselben Rhythmen verschieden wahr. Haben Afrikaner und Afrikanerinnen nun mehr „Rhythmus im Blut“ als Europäer? Wohl eher nicht. Entscheidend ist die kulturelle Vertrautheit mit dem jeweiligen Rhythmus – also das unbewusste Kennenlernen in der gewohnten sozialen Umgebung.

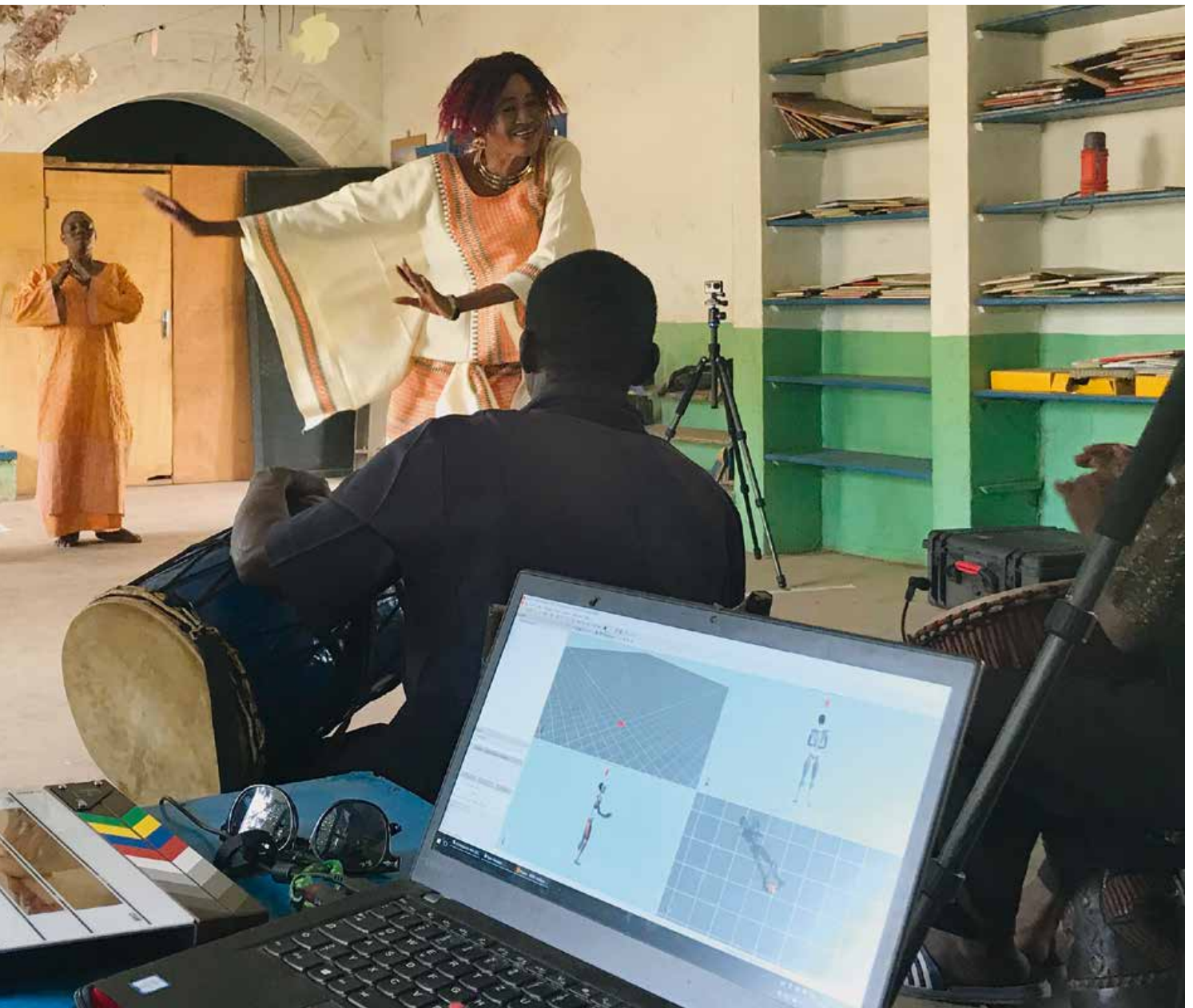
### MIT TAKTGEFÜHL



FOTO: RAINER POLAK/MPH FÜR EMPIRISCHE ÄSTHETIK

# ORTE DER FORSCHUNG

---



7



Am Start: Max-Planck-Präsident Martin Stratmann (vorne) und die Vertreterinnen und Vertreter der anderen Partner bei der formalen Gründung des Munich Quantum Valley in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

## QUANTENNETZWERK FÜR BAYERN

Ein Quantencomputer, der herkömmliche Rechner in den Schatten stellt, abhörsichere Kommunikationsverfahren und grundlegende Elemente der Quantentechnologie – das sind einige der Ziele, die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler künftig im Munich Quantum Valley verfolgen werden. Mit der feierlichen Unterzeichnung der Gründungs-urkunde wurde der Forschungsverbund im Beisein des bayerischen Ministerpräsidenten Markus Söder im Januar 2022 formal ins Leben gerufen. Gründungspartner sind die beiden Münchner Universitäten, die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg sowie die Bayerische Akademie der Wissenschaften, das Deutsche Zentrum für Luft- und

Raumfahrt, die Fraunhofer-Gesellschaft und die Max-Planck-Gesellschaft. Im Rahmen des Munich Quantum Valley soll in den kommenden fünf Jahren ein Zentrum für Quantencomputing und Quantentechnologie entstehen. Hier sollen die drei derzeit aussichtsreichsten Quantencomputing-Technologien verfügbar sein, also Computer auf der Basis von supraleitenden Qubits sowie solche mit Qubits auf der Grundlage von Ionen oder von Atomen. Ergänzend zur Förderung aus der Hightech Agenda Bayern in Höhe von 300 Millionen Euro hat die Initiative bereits mehr als 80 Millionen Euro Bundesmittel für ihr Vorhaben eingeworben.

[www.mpg.de/18167257](http://www.mpg.de/18167257)

8

## AUSGEZEICHNET ★

### ERSTES CENTER IN AUSTRALIEN

Die Max-Planck-Institute für Kolloid- und Grenzflächenforschung und für Intelligente Systeme sowie die Queensland University of Technology haben einen neuen Zusammenschluss gegründet: das Max Planck Queensland Center for the Materials Science of Extracellular Matrices (MPQC). Das erste Max Planck Center auf australischem Boden hat sich zum Ziel gesetzt, extrazelluläre Matrizen zu erforschen. Diese biologischen Materialien gelten als Stützen des Lebens: Sie sind nicht belebt, geben Zellen aber Halt, sie reagieren auf wechselnde Umweltbedingungen und speichern Informationen, die das

Wachstum von Zellen ankurbeln oder hemmen. Eine genauere Kenntnis, wie die Zusammensetzung und die Struktur extrazellulärer Matrizen ihre Funktionen beeinflusst, ist nicht nur für biomedizinische Anwendungen und ein besseres Verständnis biologischer Systeme relevant, sondern auch für technische Anwendungen, etwa in der Robotik oder der Architektur. Darüber hinaus fördert das MPQC auch den wissenschaftlichen Nachwuchs. Das Center wird Expertinnen und Experten ausbilden, die auf dem Gebiet des Bioengineering zur Weltspitze aufsteigen sollen.

[www.mpg.de/18189187](http://www.mpg.de/18189187)



FERENC KRAUSZ

Für seine bahnbrechenden Beiträge zu den ultraschnellen Laserwissenschaften und zur Attosekundenphysik erhält Ferenc Krausz

den diesjährigen Wolf-Preis in Physik. Der ungarisch-österreichische Physiker ist Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und hat einen Lehrstuhl für Experimentalphysik an der Ludwig-Maximilians-Universität München inne. Attosekunden-Lichtblitze ermöglichen es, die ultraschnellen Bewegungen von Elektronen in Molekülen und Atomen aufzunehmen. Ferenc Krausz teilt sich den Preis mit seinen Kollegen Paul Corkum von der Universität von Ottawa und Anne L'Huillier von der Universität Lund. Der Wolf-Preis in Physik gehört zu den prestigeträchtigsten Auszeichnungen in diesem Fach.



# KURZ NOTIERT

---

”

ALLE NATIONEN MÜSSEN  
ZU DER ENTSCHEIDUNG  
KOMMEN, FREIWILLIG  
AUF DIE GEWALT ALS  
LETZTES MITTEL DER  
POLITIK ZU VERZICHTEN.  
SIND SIE DAZU NICHT  
BEREIT, SO WERDEN SIE  
AUFHÖREN ZU  
EXISTIEREN.

“

MAINAUER DEKLARATION  
1955

## AUFRUF ZUM FRIEDEN

Nobelpreisträgerinnen und Nobelpreisträger verschiedenster Disziplinen haben angesichts des russischen Angriffs auf die Ukraine zum Frieden aufgerufen. Auf Initiative der Max-Planck-Gesellschaft unterzeichneten sie eine Deklaration, die auch von den Lindauer Nobelpreisträgertagungen unterstützt wird. Die Erklärung knüpft an die Mainauer Deklaration von 1955 an, mit der die Teilnehmenden der Lindauer Nobelpreisträgertagung vor einem Atomkrieg warnen und forderten, auf Gewalt als letztes Mittel der Politik zu verzichten. Einer der Initiatoren da-

mals war Otto Hahn, der erste Präsident der Max-Planck-Gesellschaft. Die circa 150 Unterzeichnenden der aktuellen Erklärung fordern von Politik und Wirtschaft, wissenschaftliche Erkenntnisse und Technologien verantwortungsvoll und im Bewusstsein der langfristigen Folgen einzusetzen. An den russischen Präsidenten Wladimir Putin ergeht der Aufruf, die völkerrechtlichen Vereinbarungen zu achten, seine Streitkräfte zurückzurufen, Verhandlungen aufzunehmen und den Frieden herzustellen.

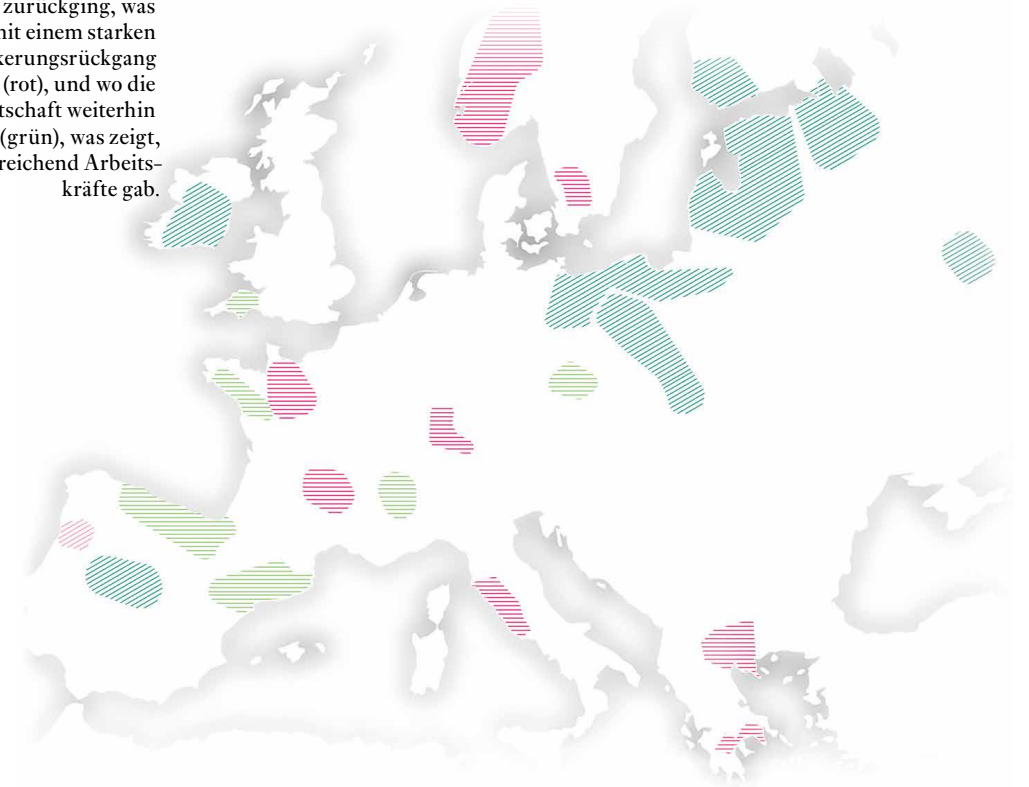
[www.mpg.de/aufruf-zum-frieden](http://www.mpg.de/aufruf-zum-frieden)

## MEDIKAMENT GEGEN KREBS IM TEST

Die US-amerikanische Arzneimittelbehörde FDA hat grünes Licht für den Eintritt in die klinische Prüfung eines neuen Medikaments gegen Krebs gegeben. Bis zu siebzig Patientinnen und Patienten mit fortgeschrittenen soliden Tumoren sollen in einer Studie der Phase 1/2 in den USA den Wirkstoff mit dem Namen Q901 erhalten. Ziel ist zunächst, die Dosierung genauer zu bestimmen. Daten aus vorklinischen Studien haben gezeigt, dass Q901, der die Cyclin-abhängige Kinase 7 (CDK7) adressiert, spezifisch Krebszellen mit abweichendem Zellteilungszyklus oder transkriptioneller Regulation abtöten kann. Die zugrunde liegende Forschung war ein gemeinsames Projekt der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, des Max-Planck-Instituts für Immunbiologie und Epigenetik in Freiburg und des von der Max-Planck-Gesellschaft gegründeten Lead Discovery Center. Das südkoreanische Biotech-Unternehmen Quirient hat die Ergebnisse über die Technologietransfer-Organisation Max-Planck-Innovation lizenziert und das Programm weiter optimiert sowie die für den Zulassungsantrag erforderlichen Studien abgeschlossen. Wenn die klinischen Studien erfolgreich verlaufen, könnte das Medikament unter anderem bei Eierstock-, Brust-, Prostata-, Darm-, Lungen- und Bauchspeicheldrüsenkrebsarten zum Einsatz kommen.

[www.mpg.de/18270598](http://www.mpg.de/18270598)

Regional unterschiedliche Auswirkungen der Pest: Anhand von Getreidepollen aus Mooren und Sedimenten lässt sich nachweisen, wo der Getreideanbau zurückging, was vermutlich mit einem starken Bevölkerungsrückgang zusammenhing (rot), und wo die Landwirtschaft weiterhin prosperierte (grün), was zeigt, dass es ausreichend Arbeitskräfte gab.



- signifikanter Anstieg
- signifikanter Rückgang
- geringfügiger Anstieg
- geringfügiger Rückgang

## LEICHTES NEUTRINO

Das häufigste Elementarteilchen im Universum ist auch das mit Abstand leichteste. Das Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (KatrIn) am Karlsruher Institut für Technologie hat nun ergeben, dass das Neutrino leichter ist als 0,8 Elektronenvolt; das entspricht etwa  $10^{-33}$  Gramm ( $10^{-33}$ : eine Null vor dem Komma, dahinter 32 Nullen und dann eine Eins). KatrIn nutzt den Betazerfall von Tritium, einem instabilen Wasserstoffisotop, und bestimmt die Neutrinomasse aus der Energieverteilung der bei diesem Zerfall erzeugten Elektronen. Dafür ist ein enormer technischer Aufwand nötig: Das 70 Meter lange Experiment beherbergt die weltweit intensivste Quelle von Tritium sowie ein riesiges Spektrometer, mit dem sich die Energien der Zerfallselektronen mit bisher unerreichter Präzision messen lassen. So haben die KatrIn-Messungen, an denen auch ein Team des Max-Planck-Instituts für Physik beteiligt war, erstmals eine Genauigkeit unter einem Elektronenvolt erreicht. Das heißt, dass die Obergrenze für die Masse des Neutrinos darunter liegt. Damit ist klar, dass das Neutrino höchstens ein Millionstel des auch nicht eben schwergewichtigen Elektrons wiegt. Um zu ermitteln, wie schwer das Neutrino wirklich ist, wird die Präzision von KatrIn nochmals erhöht. Die Kenntnis der Neutrinomasse könnte wegen der Häufigkeit des Elementarteilchens unter anderem helfen, die Modelle von der Entwicklung des Universums, zum Beispiel der Bildung von Galaxien, zu verbessern.

[www.mpg.de/18227163](http://www.mpg.de/18227163)

## WENIGER TÖDLICH ALS GEDACHT

Die Pest, die zwischen 1347 und 1352 in Europa wütete, zählt zu den bekanntesten Pandemien der Geschichte. Historiker schätzen, dass die Seuche fast die Hälfte der europäischen Bevölkerung das Leben kostete. Eine Studie zeigt nun, dass die hohe Mortalität durch die Pest weniger weit verbreitet war als angenommen. Ein internationales Team unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Menschheitsgeschichte analysierte Pollen von 261 Stätten aus 19 europäischen Ländern, um herauszufinden, welche Pflanzen in welchen Mengen dort wuchsen, und damit, wo der Ackerbau zum Stillstand kam und wo er weiterhin betrieben wurde. Demnach ging die landwirtschaftliche Aktivität vor allem in Skandi-

navien, Frankreich, Südwestdeutschland, Griechenland und Mittelitalien deutlich zurück, was mit Beschreibungen mittelalterlicher Quellen korreliert. Zentral- und Osteuropa sowie Teile Westeuropas – darunter Irland und die Iberische Halbinsel – zeigen hingegen Anzeichen für Kontinuität und dauerhaftes Wachstum. Ein Grund für die überraschenden Ergebnisse dürfte sein, dass viele der schriftlichen Quellen aus Städten stammen, in denen Menschen besonders eng aufeinander wohnten und schlechte Hygiene herrschte. Doch mehr als drei Viertel der europäischen Bevölkerung lebten damals in ländlichen Regionen, wo sich die Seuche weniger stark ausbreitete.

[www.mpg.de/18239537](http://www.mpg.de/18239537)



Wichtiger Modellorganismus:  
die Ackerschmalwand,  
*Arabidopsis thaliana*.

## WICHTIGE GENE MUTIEREN SELTENER

Veränderungen an der DNA, sogenannte Mutationen, erfolgen unabhängig von ihren Konsequenzen für den Organismus – so lautete viele Jahrzehnte lang eine Grundannahme in der Evolutionsbiologie. Ein Team am Max-Planck-Institut für Biologie Tübingen hat dieses Dogma widerlegt. Die Studie hat gezeigt, dass DNA-Abschnitte im Erbgut der Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana*, die nicht zu einem Gen gehören, doppelt so häufig mutieren wie Genabschnitte. Weniger wichtige Gene mutieren wiederum fast 50 Prozent häufiger als solche, welche die Pflanze unbedingt zum Leben benötigt. Diese Ungleichverteilung ist das Resultat chemischer Veränderungen an der DNA und an mit ihr assoziierten Proteinen. Diese Modifikationen steuern den natürlichen Reparaturmechanismus der Zellen so, dass Schäden an der DNA in besonders wichtigen Abschnitten häufiger repariert werden als im Rest des Erbguts. Dieser Befund erklärt, warum sich manche Pflanzengene nur schwer verändern lassen. Die Forschenden gehen davon aus, dass nicht nur die Ackerschmalwand, sondern alle Organismen besonders wichtige Bereiche ihres Erbguts vor Mutationen bewahren können.

[www.mpg.de/18127703](http://www.mpg.de/18127703)

## WELTREKORD IN DER FUSIONSANLAGE JET

Eine solch hohe Energieausbeute hat bisher noch keine Fusionsanlage erreicht: Der Joint European Torus (kurz Jet) im britischen Culham bei Oxford hat in einem stabilen Plasma, einem sehr heißen ionisierten Gas, in fünf Sekunden erstmals 59 Megajoule erzeugt – das entspricht einer durchschnittlichen Leistung von 11 Megawatt. Die Kernfusion könnte künftig nach dem Vorbild von Sternen praktisch unerschöpflich und klimafreundlich Energie durch die Verschmelzung von Wasserstoffisotopen liefern. Um mehr Energie zu liefern, als die Heizung des Plasmas erfordert, ist Jet allerdings zu klein.

Das Fusionsexperiment hatte ein internationales Team vorbereitet, an dem mehrere Hundert Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, darunter auch Forschende des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, beteiligt waren. Der Versuch gilt als Vorbereitung für den Betrieb der internationalen Fusionsanlage ITER, da dabei dieselbe Mischung aus den schweren Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium gezündet wurde, die auch in ITER brennen soll. ITER wird derzeit im südfranzösischen Cadarache gebaut und soll erstmals mehr Energie erzeugen, als für die Heizung nötig ist.

[www.mpg.de/18239857](http://www.mpg.de/18239857)

11



Starke Leistung:  
Dieses Fusionsplasma  
in Jet liefert  
59 Megajoule.

## OPTISCHER TASTSINN FÜR ROBOTER

Roboter könnten künftig mit mehr Fingerspitzengefühl agieren. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme in Stuttgart hat einen Sensor entwickelt, der mithilfe einer optischen Technik und künstlicher Intelligenz selbst schwache Berührungen registriert. Der Sensor namens Insight, der einem Daumen gleicht, verfügt über eine flexible, vier Millimeter dicke Hülle und ist im Innern mit einem Ring farbiger Leuchtdioden und einer Kamera ausgestattet. Die Dioden erzeugen auf der Innenseite des Sensors ein Muster, das durch Berührungen verändert und von der Kamera aufgezeichnet wird. Mit der Methode des maschinellen Lernens trainierten die Forschenden den Sensor darauf, aus den Veränderungen des Farbmusters abzuleiten, welche Kraft aus welcher Richtung auf ihn einwirkt. Anders als bisherige haptische Sensoren kann Insight Berührungen in einem größeren Bereich erfassen und spürt auch Kräfte, die parallel zu seiner Oberfläche wirken. Außerdem ist er robuster und einfacher herzustellen. So könnte er Robotern helfen, Dinge sorgsamer anzufassen und auch gefahrlos mit Menschen zu interagieren. [www.mpg.de/18337399](http://www.mpg.de/18337399)

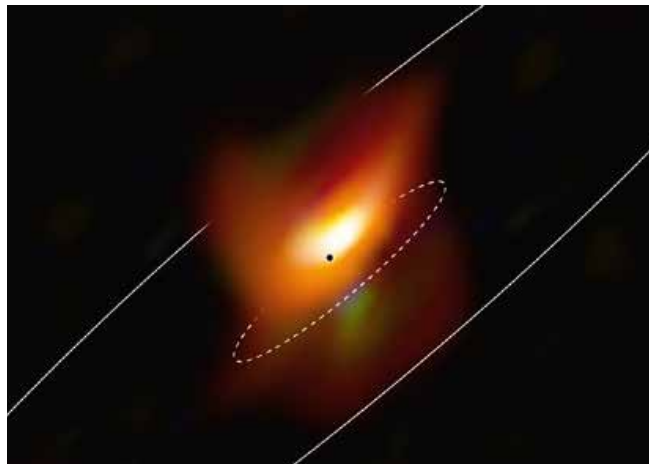
Feinfühlinger  
Daumen:  
Der Sensor Insight  
erkennt Stärke  
und Richtung von  
Berührungen  
anhand von  
Farbmustern, die  
in seinem Innern  
von Leuchtdioden  
erzeugt und von  
einer Kamera  
aufgezeichnet  
werden.



BILD: SUN, H., KUCHENBECKER, K.J. & MARTIUS, G. A SOFT THUMB-SIZED VISION-BASED SENSOR WITH ACCURATE ALL-ROUND FORCE PERCEPTION. NAT MACH INTELL 4, 135–145 (2022)

## SCHWARZES LOCH IM STAUBRING

Im Herzen der Galaxie Messier 77 (NGC 1068) lauert ein gewaltiges schwarzes Loch, das sich hinter einer kosmischen Staubwolke verbirgt. Mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) hat ein Team diese supermassereiche Schwarzkraftfalle entlarvt. Die Forschenden, unter anderen aus den Max-Planck-Instituten für Astronomie und für Radioastronomie, spürten im Zentrum der Galaxie einen dicken Ring aus kosmischem Staub und Gas auf, in dem das schwarze Loch sitzt. Es wird von Material gespeist, das sich im Bann der Schwarzkraft spiralförmig auf das Massemonster zubewegt. Dabei werden enorme Energiemengen freigesetzt, die das Licht aller Sterne in der Galaxie buchstäblich in den Schatten stellen. Ein solches schwarzes Loch steckt offenbar in allen aktiven galaktischen Kernen, auch wenn diese unterschiedlich hell leuchten. Einer 30 Jahre alten Theorie zufolge hängt dies von der Ausrichtung ab, mit der wir das schwarze Loch und seinen dicken Staubrings von der Erde aus betrachten – also davon, wie stark der Ring das schwarze Loch aus unserer Sicht verdunkelt oder gar völlig verdeckt. Die aktuellen Beobachtungen zeigen diesen Staub sehr deutlich und stehen damit ganz im Einklang mit der Theorie. [www.mpg.de/18274805](http://www.mpg.de/18274805)



Staub im Zentrum: Das Bild zeigt die innere Region der aktiven Galaxie Messier 77. Das schwarze Pünktchen verdeutlicht die wahrscheinlichste Position des schwarzen Lochs, während die innere Ellipse (gestrichelt) die Ausdehnung des dicken inneren Staubrings darstellt und die äußere die Ausdehnung der großen Staubscheibe markiert.

BILD: ESO/JAFFE, GAMEZ-ROSAS ET AL.

Reichhaltiges Ökosystem: Gemeinschaften von Dutzenden Schwämmen mit Durchmessern von einem Zentimeter bis zu einem halben Meter bedecken die oberen Gipfel des arktischen Unterwassergebirges.



FOTO: PSI/01 AWI OFOS SYSTEM

## DATENLECK MIT FOLGEN

Whistleblower helfen nicht nur, unmoralische oder kriminelle Handlungen offenzulegen, sondern auch, Täter abzuschrecken. Dafür haben Niels Johannesen von der Universität Kopenhagen und Tim Stolper, ehemaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Steuerrecht und Öffentliche Finanzen, deutliche Hinweise gefunden. Wie ihre Untersuchung ergab, mussten infolge des ersten öffentlich bekannt gewordenen Datenlecks bei der Liechtensteiner LGT Bank auch Schweizer Banken, die in Geschäfte mit grenzüberschreitender Steuerhinterziehung involviert waren, signifikante Kursverluste hinnehmen. Bei Banken, die halfen, Geld vor den Finanzbehörden zu verheimlichen, sanken offensichtlich durch das Datenleck bei der LGT Bank die Gewinnerwartungen deutlich. Da es sich bei der Liechtensteiner Steueraffäre um das erste öffentlich gewordene Datenleck handelte, hatten Steuerhinterzieher und ihre Helfershelfer – so die Interpretation der Forscher – das Risiko, das von Datenlecks ausgeht, bis dato nicht ausreichend berücksichtigt. Die erstmalige Wahrnehmung eines solchen Risikos beeinflusste demzufolge Angebot und Nachfrage nach Steueroasengeschäften und minderte die erwarteten Gewinne der entsprechenden Banken und damit auch deren Aktienkurse.

[www.mpg.de/18310916](http://www.mpg.de/18310916)

## SCHWAMMGÄRTEN IN DER TIEFSEE

Dort, wo der Arktische Ozean ständig von Eis bedeckt ist und nur wenig Licht für das Wachstum von Algen zur Verfügung steht, erreicht kaum Nahrung die tiefen Wasserschichten. Trotzdem gibt es dort Leben in Hülle und Fülle. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Bremen, Bremerhaven und Kiel haben auf den erloschenen vulkanischen Seebergen eines Unterwassergebirges am Nordpol ein dicht besiedeltes Ökosystem mit unzähligen Schwämmen entdeckt. Wie aber können diese Schwämme ihren Nährstoffbedarf in einer derart nährstoffarmen Gegend decken? Schließlich stellen die absterbenden und in die Tiefsee sinkenden Algen aus den oberen Wasserschichten weniger als ein Prozent des

Kohlenstoffbedarfs der Schwämme. Anhand von Gewebeproben haben Forschende des Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie nun herausgefunden, dass die Schwämme altes organisches Material verwerten, und zwar mithilfe von Mikroorganismen, mit denen sie in Symbiose leben. Vor Tausenden von Jahren sickerten Substanzen aus der Erdkruste und versorgten ein üppiges Ökosystem mit zahlreichen Tieren. Die Überreste dieser heute ausgestorbenen Bewohner – zum Beispiel aus Proteinen und Chitin bestehende Röhren von Würmern, fossile Tiefseequellen und andere dort hängen gebliebene organische Reste – bilden nun die Grundlage für die Schwammgärten.

[www.mpg.de/18204448](http://www.mpg.de/18204448)

## RADIOBLITZE AN UNGEWÖHNLICHEM ORT

Sie zählen zu den großen Rätseln des Weltalls: Strahlungsausbrüche, die ungefähr eine Tausendstelsekunde dauern und nur in Radioteleskopen erscheinen. Nun hat eine Gruppe unter Beteiligung des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie und seiner 100-Meter-Antenne in Effelsberg einen dieser schnellen Radiobursts (FRB) im bisher geringsten Abstand von der Erde gefunden, in der rund 12 Millionen Lichtjahre entfernten

Spiralgalaxie Messier 81. Mehr noch: Die Quelle sitzt offenbar in einem Kugelsternhaufen dieser Galaxie – wo man einen FRB am wenigsten erwartet hätte. Denn dort gibt es nur alte Sterne. Der Theorie zufolge sollten die Blitze aber von Magnetaren stammen. Und diese etwa 20 Kilometer großen Neutronensterne, die rasch rotieren und extrem starke Magnetfelder besitzen, gelten als relativ junge Überreste explodierter Sonnen.

Offenbar gibt es noch einen anderen Prozess, der zur Geburt eines Magnetars führt. Die Forschenden vermuten, dass sich ein solches Objekt auch bilden könnte, wenn ein weißer Zwerg – ein alter, ausgebrannter Stern – von einem stellaren Partner genügend Masse ansammelt und unter seinem eigenen Gewicht zu einem Magnetar kollabiert. In Kugelsternhaufen sollten viele weiße Zwerge existieren. [www.mpg.de/18336902](http://www.mpg.de/18336902)

# 12 000 000

Lichtjahre von der Erde entfernt ist der nächstgelegene bisher beobachtete schnelle Radioblitz.

## 14 FELSENBLINDER DER SHOSHONEN GENAU DATIERT

Menschenähnliche Wesen, fantastische Tiergestalten und geometrische Muster zieren Felsen im Great Basin in den USA. Tracey und Meinrat O. Andreae, die am Max-Planck-Institut für Chemie forschen, haben die Petroglyphen der Shoshonen-Ureinwohner nun erstmals zuverlässig datiert. Demnach sind die Bilder etwa 12 000 Jahre alt. Das ermittelte das Forscherpaar, indem es mit einer tragbaren Röntgenfluoreszenzröhre vor Ort den Mangananteil im Gesteinslack auf den Felsen analysierte. Diese Mischung aus Mangan- und Eisenoxiden lagert sich in Wüsten auf Felsen ab. Aus der Manganmenge, die sich auf den Felszeichnungen abgelesen hat, lässt sich deren Alter bestimmen. Die Ergebnisse der Analysen, für die keine Proben genommen werden müssen, sind genauer als bisherige Datierungen mit anderen Methoden. Dank der neuen Messungen ist nun klar, dass die Gravuren Einblicke in die Vorstellungswelt der Shoshonen in einer besonders interessanten Zeit geben, nämlich dem Übergang zwischen Pleistozän und Holozän.

[www.mpg.de/18212423](http://www.mpg.de/18212423)

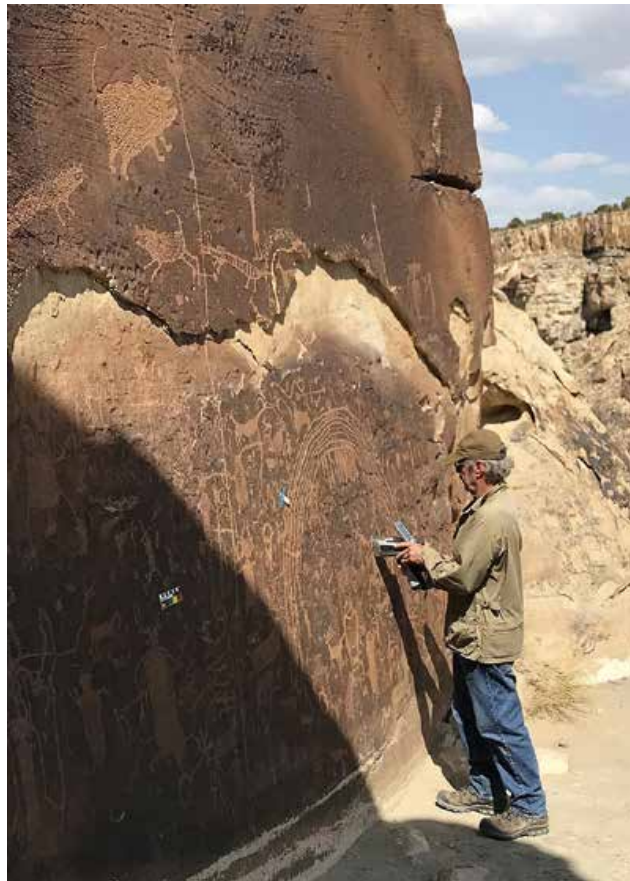


FOTO: TRACEY ANDREA, MPI FÜR CHEMIE

Mobile Datierung:  
Meinrat O.  
Andreae nimmt  
mithilfe eines  
tragbaren Röntgen-  
fluoreszenzgeräts  
Messungen am  
Gesteinslack vor.

## KUNSTGRIFF MIT VIREN

Eine neue Entwicklung aus dem Max-Planck-Institut für medizinische Forschung erleichtert die Untersuchung des Coronavirus. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben künstliche Virus-ähnliche Partikel hergestellt. Diese sogenannten Virionen besitzen eine ähnliche Struktur wie natürliche Viren, sie enthalten jedoch keine genetische Information und können sich daher nicht vermehren. In der künstlich geschaffenen chemischen Umgebung der Virionen lassen sich unterschiedliche Fragestellungen nicht nur hinsichtlich Sars-CoV-2, sondern auch zu anderen Viren untersuchen. So haben die Forschenden mithilfe der künstlichen Partikel die Wirkung von Fettsäuren analysiert, die bei Entzündungen im Körper freigesetzt werden und die Immunantwort steuern. Das Team fand heraus, dass das Spikeprotein des Coronavirus bei der Bindung einer Fettsäure seine Form ändert. Mit diesem Protein bindet der Erreger einerseits an die ACE2-Rezeptoren der Wirtszellen und infiziert sie; andererseits docken vom Wirt produzierte Antikörper daran an und markieren es für das Immunsystem. Durch die Formänderung kann das Spikeprotein nun nicht mehr an den ACE2-Rezeptor binden. So könnte das Virus eine starke Immunantwort verhindern und die Effizienz der Infektion erhöhen.

[www.mpg.de/18302290](http://www.mpg.de/18302290)

Unter dem Mikroskop: menschliche Epithelzellen (grün mit Zellkernen) und künstliche Sars-CoV-2-Virionen (magenta).

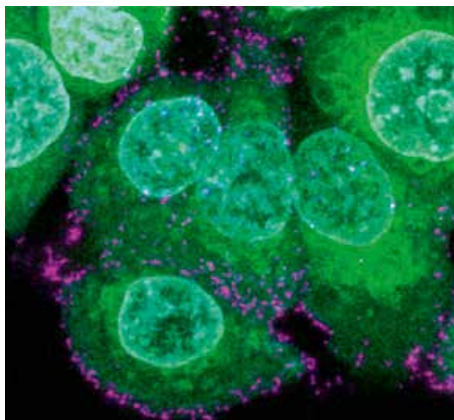


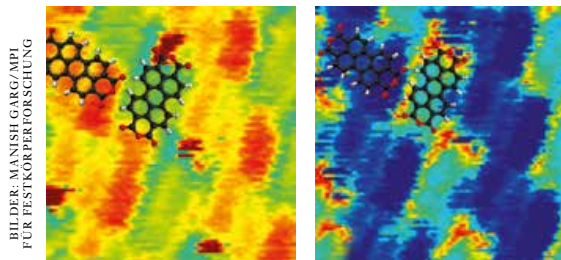
BILD: OSKAR STAUFER/MPI FÜR MEDIZINISCHE FORSCHUNG

## FILM AB!

Als Metapher muss er oft für einen großen, jedenfalls greifbaren Fortschritt herhalten – doch in der Realität ist ein Quantensprung ganz winzig, blitzschnell und kaum zu fassen. Trotzdem ist es einem Team des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung nun erstmals gelungen, einen Quantensprung im Film festzuhalten. Die Forschenden haben dafür die Rastertunnelmikroskopie mit der Attosekunden-Laserspektroskopie kombiniert. Die Rastertunnelmikroskopie ermöglicht

die hohe räumliche Auflösung, während die Spektroskopie mit Attosekundenpulsen eine extreme zeitliche Auflösung erreicht. Denn solche Pulse dauern nur den milliardsten Bruchteil einer milliardstel Sekunde. So konnte das Team die Sprünge zwischen verschiedenen Quantenzuständen eines Moleküls einfangen. Solche Vorgänge besser zu verstehen, könnte künftig auch eine präzisere Kontrolle chemischer Reaktionen ermöglichen.

[www.mpg.de/18148334](http://www.mpg.de/18148334)



BILDER: MANISH GARG/MPI FÜR FESTKÖRPERFORSCHUNG

In der Quantenwelt: zwei Bilder einer Sequenz, in der Forschende den Sprung zwischen einem energieärmeren (links) und einem energiereicheren (rechts) Zustand festgehalten haben.

15

## EIN ERBE DES NEANDERTALERS

Ob ein Mensch schwer an Covid-19 erkrankt, hängt unter anderem von bestimmten Genvarianten in seinem Erbgut ab. Forschende des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie haben vor einiger Zeit entdeckt, dass der wichtigste genetische Risikofaktor für einen schweren Covid-19-Verlauf eine Genvariante ist, die der Neandertaler an den modernen Menschen weitergegeben hat, als sich die beiden Menschenformen vor mehreren Zehntausend Jahren miteinander vermischt. Weitere Analysen haben ergeben, dass diese Variante seit dem Ende der letzten Eiszeit in ihrer Häufigkeit beim modernen Menschen zugenommen hat. Sie muss ihren Trägern folglich früher einen Überlebensvorteil verschafft haben. Die Variante liegt in einer Region auf Chromosom 3, wo sich mehrere Gene für Rezeptoren

des Immunsystems befinden. Neue Untersuchungen zeigen nun, dass Menschen mit der Covid-19-Risikovariante weniger von den sogenannten CCR5-Rezeptoren besitzen, die ein anderer Krankheitserreger als Einfallstor benutzt: das HI-Virus. Und tatsächlich weisen Träger der Covid-19-Risikovariante ein um fast 30 Prozent geringeres Risiko auf, sich mit HIV zu infizieren. Da HIV jedoch erst im 20. Jahrhundert aufkam, kann die Schutzwirkung gegen diese Infektionskrankheit nicht erklären, warum die Covid-19-Risikovariante bereits vor zehntausend Jahren beim Menschen so stark verbreitet war. Möglicherweise war es der Schutz vor einer anderen Krankheit, der nach der letzten Eiszeit zur Verbreitung dieser Genvariante beigetragen hat.

[www.mpg.de/18291680](http://www.mpg.de/18291680)

---

# DIE UNERWARTETE ZUKUNFT VON ÖL UND GAS

Wegen der Ukraine-Krise steigen derzeit die Energiepreise und verstellen den Blick auf ein Dilemma, das in naher Zukunft bevorstehen dürfte: Wenn die Energieerzeugung in vielen Staaten zunehmend ohne Erdöl und Erdgas auskommt, wird der Preis sinken. Damit wird es für Länder, die sich keine Energiewende leisten können oder wollen, wieder attraktiver, fossile Brennstoffe zu nutzen. Unser Autor plädiert daher dafür, schon jetzt die Suche nach alternativen Nutzungsmöglichkeiten zu forcieren.

Die Weltvorräte an Gas und Öl sind erheblich. Werden sie verbrannt, entsteht viel Treibhausgas. Soll die Erderwärmung im Rahmen bleiben, muss folglich die Energiewirtschaft auf fossile Brennstoffe verzichten. Aktuelle Studien zufolge dürften angesichts der gesetzten Klimaziele sechzig Prozent der Öl- und Gasbestände nicht verbrannt werden, von den Kohlevorkommen ganz zu schweigen. Wie ist das zu bewerkstelligen?

Die aktuelle nationale und internationale Klimapolitik setzt zur Dekarbonisierung auf eine Dämpfung der Nachfrage nach fossilen Energieträgern, etwa durch international handelbare CO<sub>2</sub>-Zertifikate, durch Steuern auf CO<sub>2</sub>-Emissionen, durch ein angekündigtes Verbot von Ölheizungen oder durch den zeitlich gestaffelten Abschied vom Verbrennungsmotor. Zugleich soll die Subvention klimaneutraler Energieformen Substitutionsprozesse weg von Öl und Gas in Gang setzen. Das Problem ist: Die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen muss global eingedämmt werden. Mit unverbindlichen Absprachen oder dem Vertrauen darauf, dass alle Länder schon das Richtige tun werden, wird man nicht ans Ziel gelangen. Notwendig wäre ein Abkommen mit bindenden Verpflichtungen zwischen souveränen Staaten, das die gesamte Emissionsminderung festlegt und

→



# ZUR SACHE

KAI A.  
KONRAD



ILLUSTRATION: SOPHIE KETTERER FÜR MPG

Vor seiner derzeitigen Tätigkeit als Direktor am Max-Planck-Institut für Steuerrecht und Öffentliche Finanzen war Kai A. Konrad Professor an der Freien Universität Berlin und gleichzeitig Direktor der Abteilung „Marktprozesse und Steuerung“ am Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung. In seiner Arbeit untersucht er das Zusammenspiel zwischen wirtschaftlichem Handeln und institutionellen Rahmenbedingungen. Er ist Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina und mehrerer anderer Wissenschaftsakademien. Als Mitglied und früherer Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats des Bundesministeriums der Finanzen ist er in der wirtschaftspolitischen Beratung aktiv.

---

deren Aufteilung regelt. Das ist aber nicht nur schwierig zu verhandeln, sondern auch kaum durchzusetzen und zu überwachen. Konstruktive Ansätze gibt es. Und eine Serie von mehr als 25 jährlich stattfindenden Weltklimakonferenzen, auf denen verhandelt wurde. Der Verlauf stimmt indes nicht zuversichtlich.

Ein zweites Problem entsteht, sollte der kollektive Kraftakt gelingen, die Nachfrage nach Öl und Gas weltweit zu drosseln. Mit dem Verschwinden der Nachfrage verschwinden nicht die Bestände an Erdöl und Erdgas. Unter dem Wüstensand des Staatsgebiets von Saudi-Arabien beispielsweise lagern Milliarden Barrel fossiler Brennstoffe. Bei heutigen Marktpreisen haben sie einen Wert von Abermilliarden. Was aber bedeutet es für Saudi-Arabien, wenn in wenigen Jahrzehnten die globale Nachfrage nach Öl und Gas versiegt? Die verbleibenden Vorräte würden weitgehend wertlos. Da ist es für Saudi-Arabien und für alle Länder mit großen Öl- und Gasvorkommen besser, die eigenen Vorräte schnell aus dem Boden zu pumpen und zu verkaufen, bevor sie ihren Wert verlieren. Diese Überlegungen lassen sich volkswirtschaftlich in intertemporalen Gleichgewichtsmodellen für erschöpfbare natürliche Ressourcen nachvollziehen und stehen im Einklang mit grundlegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen in der Ressourcenökonomik. Die Marktlogik besagt: Der Rückgang der Nachfrage in der Zukunft führt zu einem stark ansteigenden Öl- und Gasangebot in der Gegenwart und damit zu einem Preisverfall. Sinkt der Preis, steigt die Nutzung von Öl und Gas, und damit steigen auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Ländern, die sich an keinem Klimaabkommen beteiligen, und auch anderswo, bis die Nachfragerestriktionen aus einem Abkommen greifen. Der Preisverfall macht es zudem für alternative Energieträger schwierig, sich am Markt gegen billiges Öl und Gas durchzusetzen. Auch die natürlichen Innovationsanreize für grüne Technologien sinken.

18

VERSIEGT  
DIE NACHFRAGE,  
WÜRDEN DIE  
VERBLEIBENDEN  
VORRÄTE  
WEITGEHEND  
WERTLOS

Kriegs- und sanktionsbedingt folgten der Gas- und der Ölpreis in den vergangenen Wochen nicht dem hier beschriebenen Muster. Lieferausfälle aus Russland zu kompensieren dauert eine Weile, verändert aber nicht die Gesamtmengen an Öl und Gas, die insgesamt und über die Zeit zur Förderung vorhanden sind. Insofern stehen diese Preiskapriolen nicht im Widerspruch zu den hier skizzierten Angebotsentscheidungen in den kommenden Jahren und Jahrzehnten, die zu erwarten sind, wenn ein verbindliches und wirksames globales Klimaabkommen zustande kommt.

In der Wissenschaft haben sich für dieses Problem die Begriffe *rush to burn* oder auch grünes Paradoxon etabliert. Es mag paradox klingen, aber die sich allmählich verschärfenden politischen Maßnahmen, die die energetische Nutzung fossiler Kohlenwasserstoffe in der Zukunft einschränken,

verkehren in der Gegenwart die gewünschten klimapolitischen Effekte eines Klimaabkommens in ihr Gegenteil. Auf solche Gefahren hat die umfangreiche theoretische Literatur zum grünen Paradoxon hingewiesen und empirische Evidenz für entsprechende Verhaltens- und Marktreaktionen erbracht. Der Wirtschaftswissenschaftler Hans-Werner Sinn wurde für das Überbringen dieser schlechten Nachricht 2009 mit dem „Dinosaurier des Jahres“ ausgezeichnet. Inzwischen hat sich die zwingende Logik des Zusammenhangs zumindest unter Klimaökonomern herumgesprochen.

Angesichts dieser Probleme wurde vor einigen Jahren vorgeschlagen, die Länder mit Öl- und Gasvorräten dafür zu bezahlen, dass sie diese Vorräte nicht fördern, sondern auf ewig im Boden lassen. Eine überzeugende Lösung ist das nicht, denn die erforderlichen jährlichen Kompensationszahlungen an die Rohstoffländer übersteigen leicht unsere Vorstellungskraft. Und Verhandlungen über die Finanzierung durch die Staatengemeinschaft würden ähnlich schwierig wie die auf Nachfragemassnahmen gerichteten Klimaverhandlungen.

Besser wäre es, Gas und Öl zu fördern und nutzbringend einzusetzen, aber nicht klimaschädlich, sondern für klimaneutrale oder klimafreundliche Produkte. Das würde den Markt radikal verändern. Öl und Gas wären als Rohstoffe für zukünftige Produkte wertvoller, als sie derzeit sind. Der *rush to burn* würde gestoppt. Kein Ressourcenland müsste seine Vorräte so schnell wie möglich fördern und zu Dumpingpreisen verkaufen, man könnte sich vielmehr mit der Förderung und dem Verkauf Jahrzehnte Zeit lassen. In der Folge wären Öl und Gas schon heute knapper und die Preise höher. Höhere Preise würden die Energiewende beflügeln, denn alternative klimafreundliche Energiekonzepte wären am Markt konkurrenzfähiger und ihre Innovation wirtschaftlich interessanter. Im Idealfall würden Öl und Gas zu wertvoll und zu teuer, um überhaupt noch verbrannt zu werden. Und ein internationales Klimaabkommen, CO<sub>2</sub>-Steuern oder Nutzungsverbote für Öl und Gas zu Verbrennungszwecken würden überflüssig.

Auch wenn manche der wirtschaftlich interessanten klimaneutralen Produkte aus Öl und Gas erst in Jahren oder Jahrzehnten marktreif sein sollten, zeigen gleichgewichtstheoretische Überlegungen, dass die Wirkung auf dem Markt unmittelbar und bereits heute einsetzt. Das hat mit einer Besonderheit von Rohstoffmärkten zu tun. Der Ressourcenvorrat an Öl und Gas ist gegeben und endlich. Wer seinen Vorrat heute verschleudert, hat morgen nichts mehr zu verkaufen. So wie eine drohende Wertlosigkeit von Öl und Gas die schnellere Förderung beflügelt, führt die Perspektive einer wirtschaftlich attraktiveren zukünftigen Nutzung zu einer Angebotszurückhaltung der Ressourceneigner. Es lohnt sich, die Vorräte zu schonen und mit dem Verkauf zu warten. Auch diese Intuition lässt sich durch modelltheoretische Ergebnisse stützen.

→

## EIN ZUKUNFTS- VERSPRECHEN REICHT AUS, UM DEN AUSVERKAUF ZU STOPPEN

Ohne klare klimafreundliche Nutzungsalternativen wären diese Überlegungen nur Glasperlenspiele. Was aber könnten die klimaneutralen Verwendungen für Öl und Gas sein? Eine der vielleicht interessantesten Ideen besteht in der Erzeugung von Wasserstoff aus Methan, das mit circa 75 bis 99 Prozent der Hauptbestandteil von Erdgas ist. Daran wird auch in der Max-Planck-Gesellschaft geforscht. Bisher ist vor allem die Gewinnung von „grauem“ oder „blauem Wasserstoff“ bekannt: Dabei erfolgt die Aufspaltung von Methan unter zumindest teilweiser Freisetzung von  $\text{CO}_2$ . Eleganter sind Verfahren wie die katalytische Pyrolyse. Dieses Verfahren vermeidet die Freisetzung von  $\text{CO}_2$  und gewinnt neben Wasserstoff auch reinen Kohlenstoff, teilweise in Form wertvoller Nanomaterialien. Eine rege Veröffentlichungsaktivität belegt Fortschritte bei der Produktion dieses „türkisen Wasserstoffs“. Die katalytische Zerlegung erfordert zwar Energiezufuhr, aber nur etwa ein Achtel der Energiezufuhr, die für die Gewinnung von „grünem Wasserstoff“ nötig ist, der derzeit in aller Munde ist.

Wasserstoff ist als klimafreundlicher und  $\text{CO}_2$ -neutraler Energieträger ein zentraler Input in einer Wirtschaft nach der Transformation. Vielleicht noch wichtiger als der Wasserstoff sind die bei der Pyrolyse entstehenden Kohlenstoff-Nanomaterialien (CNTs). Aus CNTs gefertigte Carbonprodukte finden mögliche Anwendungen unter anderem im Bauwesen, im Fahrzeugbau und in der Luft- und Raumfahrt. Sie könnten dort traditionelle Materialien wie Stahl, Aluminium oder Beton ersetzen. Da diese Materialien üblicherweise mit einem erheblichen  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck hergestellt werden, könnten durch die Substitution in großem Umfang  $\text{CO}_2$ -Emissionen eingespart werden.

Bis zu einer großtechnischen Nutzung der  $\text{CO}_2$ -emissionsfreien katalytischen Pyrolyse mag es noch einige Zeit hin sein. Aber die gleichgewichtstheoretische Analyse intertemporaler Zusammenhänge in Märkten für erschöpfbare Rohstoffe zeigt: Für die wirkliche Umkehrung des *rush to burn* ist eine sofortige Verfügbarkeit der klimafreundlichen Verwendungsmöglichkeiten von Öl und Gas nicht erforderlich. Ein Zukunftsversprechen auf solche Nutzungsoptionen reicht aus, um den Ausverkauf zu stoppen.

Die  $\text{CO}_2$ -freundliche Nutzung von Kohlenwasserstoffen muss sich nicht auf die Zerlegung von Methan beschränken. Auch für Erdöl gibt es bereits heute klimapflegliche Verwendungen. Beispiele sind Kunstfasern, Dämmstoffe in der Bauindustrie oder Produkte aus Plastik. Quantitativ spielen diese heute noch eine eher untergeordnete Rolle. Das ließe sich jedoch ändern. Außerdem denken viele bei Plastik wohl unmittelbar an die Verschmutzung der Weltmeere mit Plastikabfällen, die biologische Belastung

ES IST WENIG  
HILFREICH,  
PRODUKTE AUS  
NACHWACH-  
SENDEN  
ROHSTOFFEN  
ZU FÖRDERN

durch Mikroplastikpartikel in Fischen, Tieren und im Menschen und daran, dass das Plastik, das nicht entlang der Wasserstraßen in die Weltmeere treibt, nur allzu häufig in Müllverbrennungsanlagen landet und dort klimabelastend verbrannt wird. Allerdings ist das nicht ein Argument gegen die Nutzung von Erdöl zur Erzeugung nützlicher Kunststoffe an sich, sondern nur dagegen, wie unsere Wirtschaft und Gesellschaft heute mit Kunststoffen umgeht. Der Weg von Produkten aus Plastik in die Weltmeere oder in die Müllverbrennung ist nicht naturgesetzlich.

Wenn Plastik beispielsweise am Ende seiner Nutzung in der Erde deponiert wird, also da landet, woher der Rohstoff für Plastik ursprünglich kommt, treten die negativen Umwelt- und Klimawirkungen der Plastiknutzung nicht ein. Kunststoffe würden dann zu einer Verwendung, welche Rohöl wertvoll macht, es der CO<sub>2</sub>-intensiven energetischen Nutzung entzieht und fossile Kohlenwasserstoffe für lange Zeit klimaneutral zu binden vermag.

Türkiser Wasserstoff, Karbonfasern, Kunststoffe und andere Ölprodukte wären ein Anfang, dem *rush to burn* zu begegnen. Wichtiger noch als die hier genannten Produkte aus Rohöl und Erdgas sind vielleicht die Produkte, die es heute noch gar nicht gibt, die aber in den kommenden Jahren erfunden und innoviert werden könnten. Die Politik kann helfen, diese Prozesse

in Gang zu setzen durch klare Weichenstellungen und die Schaffung langfristiger stabiler Rahmenbedingungen.

Entscheidend für die Umkehrung des *rush to burn* ist es, Erdgas und Erdöl für klimaneutrale Nutzungen knapp und wertvoll zu machen. Es ist deshalb wenig hilfreich, Produkte zu fördern, die der klimaneutralen Nutzung fossiler Brennstoffe die Nachfrage entziehen, etwa Substitute aus nachhaltigen Ressourcen wie Holz oder Substitute aus nachwachsenden Pflanzen. Paradoxerweise sind solche Produkte und ihre Förderung eher geeignet, den *rush to burn* zu befeuern.

Eher zieladäquat wäre eine Politik, die die Innovation von klimafreundlichen Produkten aus Öl und Gas fördert. Die Bauindustrie sollte, statt auf Baumaterialien aus dem Mittelalter zu setzen, den Ersatz von Stahl, Aluminium und Beton durch karbonbasierte Baumaterialien forcieren. Karbonbasierte, klimaneutral produzierte Konstruktionsmaterialien könnten vermutlich im Bereich des Automobilbaus oder der Luftfahrt CO<sub>2</sub>-intensiv erzeugte Baumaterialien ersetzen – möglicherweise sogar mit positivem Einfluss auf die Grenzen des technisch Machbaren. Und wenn so Gas und Öl hinreichend attraktiv und damit teuer werden, kann auch die Energiewende gelingen, und zwar auf marktwirtschaftlichem Wege und ohne hohe Subventionen.



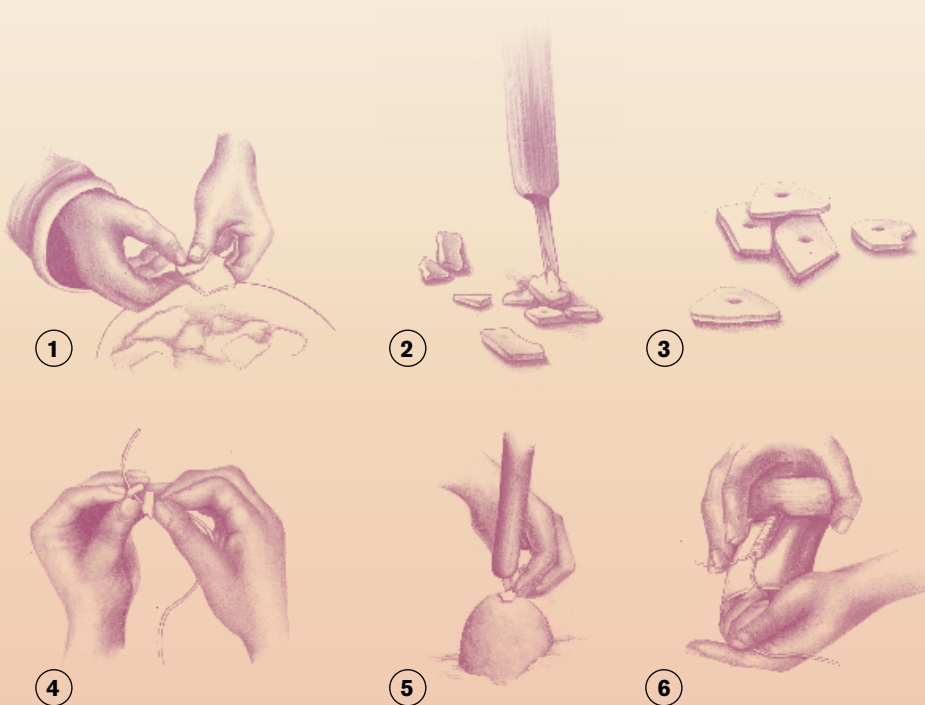
# EIN URALTES PERLENNETZWERK

Perlen aus Straußeneierschalen gelten als der älteste handwerklich gefertigte Schmuck. Jennifer M. Miller und Yiming Wang vom Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in Jena haben 1500 Perlenfunde verschiedener frühgeschichtlicher Phasen aus Ost- und Südafrika miteinander verglichen und eine überraschende Entdeckung gemacht: Vor etwa 50 000 bis 33 000 Jahren nutzten Menschen, die etwa 3000 Kilometer entfernt voneinander lebten, nahezu identische Perlen. Die Übereinstimmungen sind so weitgehend und einmalig, dass sie sich nur mit einem kulturellen Austausch zwischen den beiden weit entfernten Populationen erklären lassen.



Die ältesten Perlenfunde aus dem Süden Afrikas sind mehr als 43 000 Jahre alt (oben). Jüngere Exemplare aus der Region sind in der Regel wesentlich kleiner, wie diese 1100 bis 11 000 Jahre alten Perlen (Mitte). Die Größenverteilung der Perlen aus dem Osten unterschied sich dagegen über die Jahrtausende hinweg nicht, hier rund 10 000 Jahre alte Funde aus Tansania (unten).

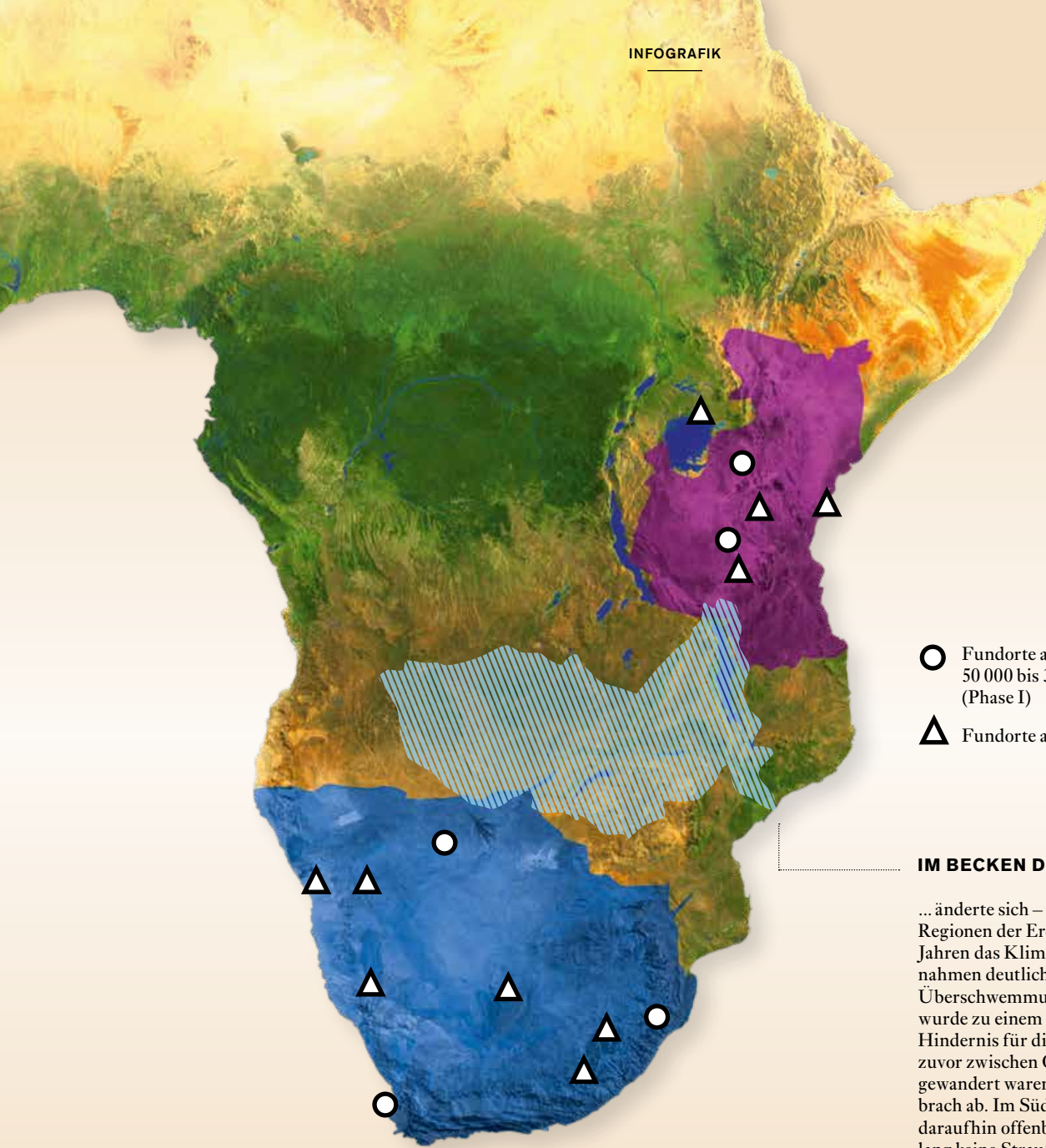
22



## HERSTELLUNG

Noch heute werden in Afrika Perlen aus Straußeneiern handwerklich gefertigt:

- ① Straußeneierschalen werden in kleine Stücke gebrochen.
- ② Von der Innenseite wird ein Loch in jedes Stück gebohrt.
- ③ Die Rohlinge sind noch sehr ungleichmäßig geformt.
- ④ Zur Weiterverarbeitung werden sie auf eine Schnur gefädelt.
- ⑤ Jede Perle wird einzeln abgerundet, als Werkzeug dient zum Beispiel ein Tierhorn.
- ⑥ Die Ränder der aufgefädelten Perlen werden mithilfe eines speziell geformten Steins glatt geschliffen.

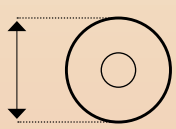


- Fundorte aus der Zeit vor 50 000 bis 33 000 Jahren (Phase I)
- △ Fundorte aus späteren Phasen

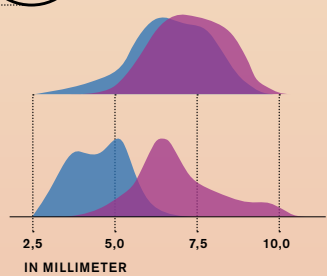
**IM BECKEN DES SAMBESI**

... änderte sich – wie in vielen Regionen der Erde – vor rund 33 000 Jahren das Klima. Die Regenfälle nahmen deutlich zu, es kam zu Überschwemmungen. Der Fluss wurde zu einem unüberwindlichen Hindernis für die Menschen, die zuvor zwischen Ost- und Südafrika gewandert waren, der Austausch brach ab. Im Süden Afrikas gab es daraufhin offenbar jahrtausendlang keine Straußeneierperlen mehr (Phase II). Erst ab der Zeit vor 19 000 Jahren sind wieder Perlenfunde belegt (Phase III).

**GRÖSSENVERTEILUNG DER PERLENDURCHMESSER**



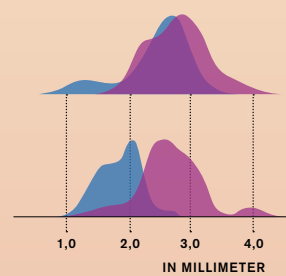
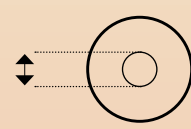
- östliches Afrika
- südliches Afrika



Phase I (vor 50 000 bis 33 000 Jahren)

Phase III (vor 19 000 bis 11 600 Jahren)

**GRÖSSENVERTEILUNG DER LOCHDURCHMESSER**



# IM FOKUS

---


## UNTER DRUCK

**24** | Wasserstoff in leitender Funktion

**32** | Stress lass nach

**38** | Knochenarbeit

FOTO: JAN HOSAN



Edelsteinpresse: Das Mainzer Team verwendet zwei kegelförmige synthetische Diamanten, um Materialien unter hohem Druck zu setzen. Die mikrometergroßen Spitzen der Steine mit der dazwischenliegenden Probe drücken die Forschenden in einer Stempelzelle zusammen, von der hier nur ein Teil zu sehen ist.



# WASSERSTOFF IN LEITENDER FUNKTION

*TEXT: CHRISTIAN J. MEIER*

25

Materialien, die Strom ohne Verluste leiten können, würden in vielen Bereichen die Energieeffizienz erhöhen. Dafür müssten allerdings die Temperaturen, bei denen diese Supraleitung auftritt, praxistauglicher werden. Mikhail Eremets und sein Team am Max-Planck-Institut für Chemie sind diesem Ziel mit einem neuen Ansatz deutlich näher gekommen – nicht zuletzt, indem sie ihre Materialien unter geradezu astronomischen Druck setzen.

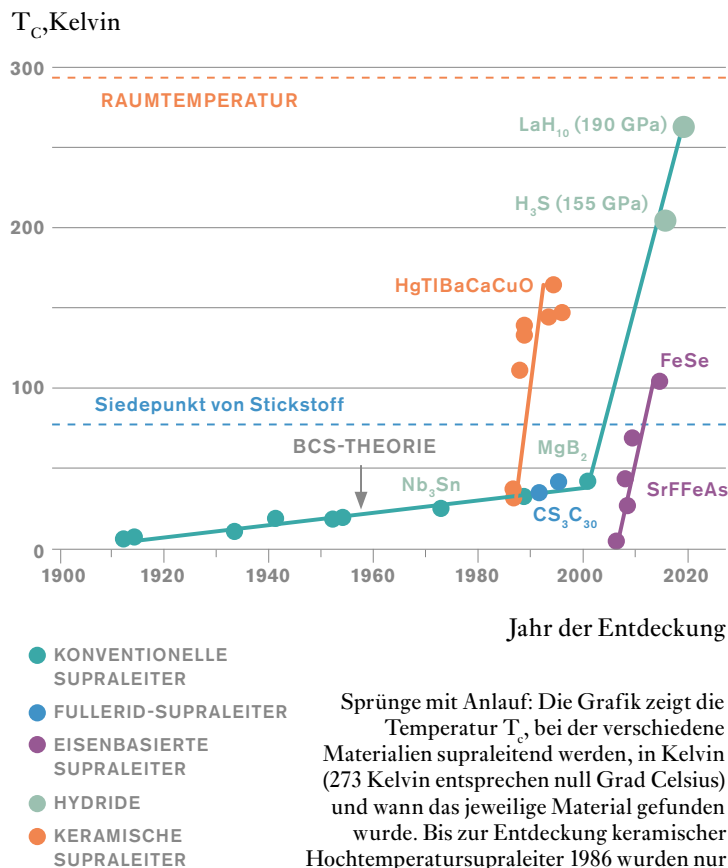
Sieht sich der Besucher im Büro von Mikhail Eremets um, weiß er kaum, wo er zuerst hinschauen soll: Neben Physikbüchern füllen Werkstücke aus Metall die Regale, Monitor und Tastatur auf einem Tisch, zwei Mikroskope sind auf ein weiteres gestapelt. Am Boden liegen Hanteln, über der Tür ist eine Klimmzugstange angebracht. Offensichtlich lebt der Physiker hier, im Raum B 2.75 des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz, und er lebt für seine Forschung – mit Erfolg. Mit seinen Arbeiten hat Eremets geschafft, was nur wenigen Wissenschaftlern vergönnt ist: Er hat einem Forschungsgebiet, das lange Zeit nicht die erhofften Durchbrüche brachte, eine ganz neue Perspektive gegeben.

Es geht um das Phänomen Supraleitung, das vor mehr als hundert Jahren entdeckt und vor 65 Jahren erklärt wurde und den Alltag der Menschen sehr verändern könnte: Supraleiter leiten elektrischen Strom ohne jeden Widerstand. Sie würden viele neue Anwendungen ermöglichen: Flugzeuge mit leichten, aber starken Elektromotoren, leichtere Generatoren für Windkraftanlagen, Magnetschwebbahnen oder MRT-Geräte in jeder Arztpraxis. Auch völlig neuen Technologien könnten Supraleiter den Weg ebnen: Kernfusionskraftwerken und ultraschnellen Quantencomputern.

## Anfangs langsamer Fortschritt

Mikhail Eremets erzählt die Geschichte der Supraleitung als einen der größten Erfolge der Physik. Doch sie endet frustrierend. Zunächst jedenfalls. Die Geschichte beginnt mit dem niederländischen Physiker Heike Kamerlingh Onnes, der vor über hundert Jahren erstmals das Edelgas Helium verflüssigte – bei nur vier Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt. 1911 kühlte er Quecksilber mithilfe von flüssigem Helium und stellte fest: Bei etwa minus 269 Grad Celsius verliert das Metall schlagartig den elektrischen Widerstand. Onnes hatte die Supraleitung entdeckt. Doch für die Praxis war ein Supraleiter, der so stark gekühlt werden muss, völlig unbrauchbar. Und das blieben die Materialien lange auch. „Danach gab es nur sehr langsame Fortschritte“, sagt Eremets. Daran änderte sich auch nichts, als John Bardeen, Leon Neil Cooper und John Robert Schrieffer 1957 mit der nach ihnen benannten BCS-Theorie erklärten, warum gewisse Metalle unterhalb einer bestimmten Temperatur, der Sprungtemperatur, Strom widerstandslos leiten.

Bei höheren Temperaturen entsteht elektrischer Widerstand, weil Elektronen auf dem Weg durch das Kristallgitter eines Metalls immer wieder mit einzelnen Atomen wechselwirken und von ihrer Bahn abgelenkt werden. In einem supraleitenden Material ist das anders. Darin zieht ein Elektron bei seinem Vorbeiflug die positiv geladenen Atomrümpfe des Gitters zu sich heran. Da es ein wenig dauert, bis die Atome wieder zurückfedern, entsteht vorübergehend eine Spur, in



Sprünge mit Anlauf: Die Grafik zeigt die Temperatur  $T_c$  bei der verschiedene Materialien supraleitend werden, in Kelvin (273 Kelvin entsprechen null Grad Celsius) und wann das jeweilige Material gefunden wurde. Bis zur Entdeckung keramischer Hochtemperatursupraleiter 1986 wurden nur langsam höhere Sprungtemperaturen gefunden. Neue Rekorde setzten die Mainzer Forscher mit den Hydriden  $H_3S$  und  $LaH_{10}$ .

der die Atome näher zusammenliegen als im Rest des Kristalls, die also positive Ladung konzentriert. Damit zieht die Spur ein zweites Elektron an, das dem ersten in gebührendem Abstand – die Elektronen selbst stoßen einander ja ab – folgt. Die beiden Elektronen bilden nun ein Cooper-Paar, benannt nach einem der Väter der BCS-Theorie. Im Supraleiter entstehen sehr viele Cooper-Paare.

Was dann geschieht, lässt sich nur im Rahmen der Quantenmechanik verstehen. Gemäß dieser Theorie können sich Teilchen wie Wellen verhalten. Die Materiewelle eines Teilchens dehnt sich mit sinkender Temperatur aus. Für die Materiewellen der Cooper-Paare bedeutet das: Sie überlagern sich. Weil sich nun keine einzelnen Paare mehr unterscheiden lassen, verschmelzen sie zu einem gemeinsamen Zustand, der sich über den gesamten Leiter ausdehnt. Es gibt nun keine einzelnen Elektronen mehr, die sich am Atomgitter reiben und dabei Energie verlieren. Vielmehr bilden die Cooper-Paare einen makroskopischen Quantenzustand, den punktuelle Hindernisse wie Atomkerne nicht beeinträchtigen. Der elektrische Widerstand löst sich in Nichts auf. „Man sollte glauben, dass eine Erklärung der Supraleitung eine Anleitung für Experimente lieferte, die zu höheren Sprungtemperaturen führen“, sagt Eremets. Doch die Hoffnung

erfüllte sich zunächst nicht. Einer der engagiertesten Forscher auf diesem Gebiet, der Deutschamerikaner Bernd Matthias, stellte 1971 ernüchtert fest: Die Supraleitung bei Raumtemperatur wird für immer ein Wunschtraum bleiben.

Immerhin fanden Physiker inzwischen Tausende supraleitende Materialien. Zudem entdeckten sie eine zweite Klasse von Supraleitern: Keramiken mit deutlich höheren Sprungtemperaturen von bis zu minus 135 Grad Celsius, sogenannte Hochtemperatursupraleiter. Doch diese Art der Supraleitung ist nicht mit der Wechselwirkung zwischen Elektronen und den Schwingungen des Kristallgitters zu erklären. Demgegenüber lassen sich metallische Supraleiter dank der BCS-Theorie grundlegender erforschen, was Eremets versucht. Er räumt so auch mit einem Vorurteil auf. Denn zu den metallischen Supraleitern herrschte die Meinung vor, dass es für die Sprungtemperatur eine Obergrenze gebe, die so niedrig sei, dass sich keine praxistauglichen Supraleiter finden würden.

Alles hoffnungslos also? Mikhail Eremets lehnt sich in seinem Bürostuhl zurück. „Nehmen wir mal etwas Abstand“, sagt er. Er zeigt ein Bild mit den Planeten des Sonnensystems. Jupiter und Saturn stechen mit

ihren Größen weit hervor. Die Riesenplaneten bestehen hauptsächlich aus Wasserstoff. Im Innern der Planeten geraten die Moleküle wegen der Schwerkraft unter enormen Druck. Mit zunehmender Tiefe wird der Wasserstoff immer mehr verdichtet. Die Moleküle brechen auf, und die Wasserstoffatome rücken sehr dicht aufeinander. Schließlich bilden sie ein Atomgitter. Die Physik vermutet schon lange, dass Wasserstoff in diesem Zustand elektrisch leitfähig wird und damit metallisch. „Wir beschäftigen uns hauptsächlich mit metallischem Wasserstoff“, sagt Eremets. Allerdings ist zu seiner Herstellung ein Druck nötig, wie er im äußeren Erdkern herrscht – etwa drei Millionen Mal so groß wie der Luftdruck am Erdboden. Aber wie wollen die Mainzer Forscher einen derart hohen Druck erzeugen?

Eremets hält einen Zylinder aus Metall zwischen Daumen und Zeigefinger, der an das Verbindungsstück zweier Rohre erinnert. Es ist eine Diamantstempelzelle, die enorme Drücke erzeugt. Mit Druck verhält es sich ähnlich wie mit einer Fahrradkette: Auf die Übersetzung kommt es an. Es zählt nicht nur, wie stark man drückt. Konzentriert man eine gegebene Kraft auf die Hälfte der Fläche, verdoppelt sich der Druck. Die Stempelzelle presst die Spitzen zweier Diamanten auf einer Fläche, die kleiner ist als der Querschnitt ei-

Feinschliff: Panpan Kong, Wissenschaftlerin im Mainzer Team, bearbeitet mit einem fokussierten Ionenstrahl einen Diamanten, der auf dem linken Bildschirm zu erkennen ist.

27

FOTO: JAN HOSAN



nes Haares, zusammen. So reicht es schon, die Inbuschrauben an der Zelle anzuziehen, um zwischen den Diamanten Drücke von Millionen bar zu erzeugen. Damit gelang es Eremets und seinem Kollegen Ivan Troyan im Jahr 2011, Wasserstoff in einen elektrisch leitfähigen Zustand zu bringen, bei 2,7 Millionen bar (Megabar) Druck – am Erdboden herrscht etwa 1 bar. Inzwischen sammelten das Mainzer Team und andere Wissenschaftler weitere Belege, dass Wasserstoff unter hohem Druck metallisch wird.

Doch was hat das mit dem Traum eines Raumtemperatursupraleiters zu tun? Schon vor mehr als 50 Jahren überschrieb der britische Physiker Neil Ashcroft einen Artikel: *Metallischer Wasserstoff: ein Hochtemperatursupraleiter*. Die BCS-Theorie lege dies nahe, argumentierte Ashcroft. „Er drückte sich sehr vorsichtig aus“, meint Eremets. „Damals war das einfach schwer vorstellbar.“ Jahre später jedoch machte Ashcroft eine weitere Prognose: dass auch chemische Verbindungen, die reich an Wasserstoff sind, hohe Sprungtemperaturen haben könnten. Laut Ashcroft üben die anderen chemischen Elemente in der Verbindung schon einen Druck auf den Wasserstoff aus, sodass es weniger zusätzlichen Druck braucht, um ihn metallisch zu machen. Damals keimte die Hoffnung auf, ein Raumtemperatursupraleiter sei nun leichter zu erreichen.

„Nun kam etwas Faszinierendes dazu“, sagt Eremets. Physiker hatten inzwischen gelernt, Kristalle in Computern zu simulieren. Dies verdankten sie der steil gewachsenen Rechenleistung von Halbleiterchips. Zudem seien auch die Rechenmethoden optimiert worden, sagt Reinhold Kleiner, der Supraleitung an der Universität Tübingen erforscht. „Die Forschenden wissen besser, welche Näherungen sie machen können und welche nicht.“ Damit war es auch möglich, grob die Sprungtemperatur für einen Supraleiter zu prognostizieren. Das taten Physiker für Hunderte Wasserstoffverbindungen. Auch für Trihydrogensulfid ( $H_3S$ ) – eine gute Wahl. Denn wenig später, im Jahr 2015, sorgte Eremets' Team um den Erstautor Alexander Drozdov für Aufsehen: Es erzielte einen neuen Rekord für die Sprungtemperatur. Unter hohem Druck verdichten sich die Moleküle zu einem  $H_3S$ -Kristall. Dieser wurde bei moderaten minus 70 Grad Celsius supraleitend. Diese Temperatur lässt sich mit flüssigem Stickstoff erreichen, der technisch viel leichter herzustellen ist als flüssiges Helium. Allerdings musste das Team immer noch einen Druck von etwa einem Megabar aufwenden – etwa ein Drittel dessen, was für die Herstellung von metallischem Wasserstoff nötig war.

Der Erfolg gründe auf einem Paradigmenwechsel, meint Eremets. Zuvor waren relativ hohe Sprungtemperaturen eher zufällig entdeckt worden. „Nun arbeiten Theoretiker und Experimentatoren systematisch zusammen“, sagt der Physiker. Seine eigene Gruppe etwa hat alles, was für experimentelle Studien nötig ist – von der Herstellung der Proben bis zu deren umfang-

sender Untersuchung. So kann das fünfköpfige Mainzer Team Diamanten auf den tausendstel Millimeter genau bearbeiten. Als Schmuck eigneten sich die Diamanten aber nicht, scherzt Eremets: Sie seien nur circa zwei Millimeter groß und hätten 0,1 Karat. An der Spitze dieser Diamanten bringen die Forschenden mit einer mannshohen Maschine die höchst filigranen elektrischen Leitungen an, mit denen die Leitfähigkeit der Probe untersucht werden kann. Die Kontakte kommen einander wenige tausendstel Millimeter nahe, dürfen sich aber nicht berühren. Das metallische Gehäuse der Stempelzelle fertigt die hauseigene Metallwerkstatt des Max-Planck-Instituts für Chemie.

Eines der Labors ist abgedunkelt. Dort arbeiten Laser, die das Mainzer Team zum Heizen der Probe nutzt und um diese spektroskopisch zu untersuchen. Die sogenannte Raman-Spektroskopie liefert Hinweise, wie der hohe Druck die Materialeigenschaften verändert. In dem Labor steht auch ein tonnenförmiges Messgerät, ein Squid-Magnetometer, das eine Eigenschaft nachweist, die nur Supraleiter haben: Sie verdrängen magnetische Felder vollständig aus ihrem Inneren – die Physik spricht vom Meissner-Ochsenfeld-Effekt. Dabei bauen Supraleiter um sich herum ein dem äußeren Magnetfeld exakt entgegengesetztes Feld auf, sodass ein Magnet über einem Supraleiter schweben kann. „Für die Messung im Squid-Magnetometer braucht man eine besonders kleine Stempelzelle, die in das Messgerät passt“, sagt Eremets. Aus „reiner Neugier“ hatte der Physiker schon eine kleine Zelle hergestellt, bevor sein Team das Squid-Gerät besaß, nur um auszuprobieren, ob es geht. So verfügte er bereits über das Know-how, als die Fachzeitschrift *Nature* vor einer Publikation verlangte, dass der Meissner-Ochsenfeld-Effekt nachgewiesen werden müsse.

Mit seinen Instrumenten kann Eremets' Team auch eine der interessantesten Fragen bearbeiten: Wie erklärt sich die hohe Sprungtemperatur von  $H_3S$  und anderer Wasserstoffverbindungen? Die Theorie dazu hatte bereits der Pionier Neil Ashcroft geliefert. Demnach müsste sich Wasserstoff als Supraleiter besonders gut eignen, weil er den leichtesten Atomkern besitzt: ein einzelnes Proton. Dieses wird von vorbeifliegenden Elektronen besonders leicht angezogen. Es hinterlässt laut BCS-Theorie eine besonders deutliche positiv geladene Spur, der das zweite Elektron des Cooper-Paares leicht folgen kann. Um zu prüfen, ob dieser Mechanismus im  $H_3S$  wirkt, hat das Mainzer Team das

---

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Supraleitung wurde lange nur bei Temperaturen weit unter null Grad Celsius beobachtet. Ein Mainzer Max-Planck-Team hat sie inzwischen schon bei minus 23 Grad Celsius erreicht.

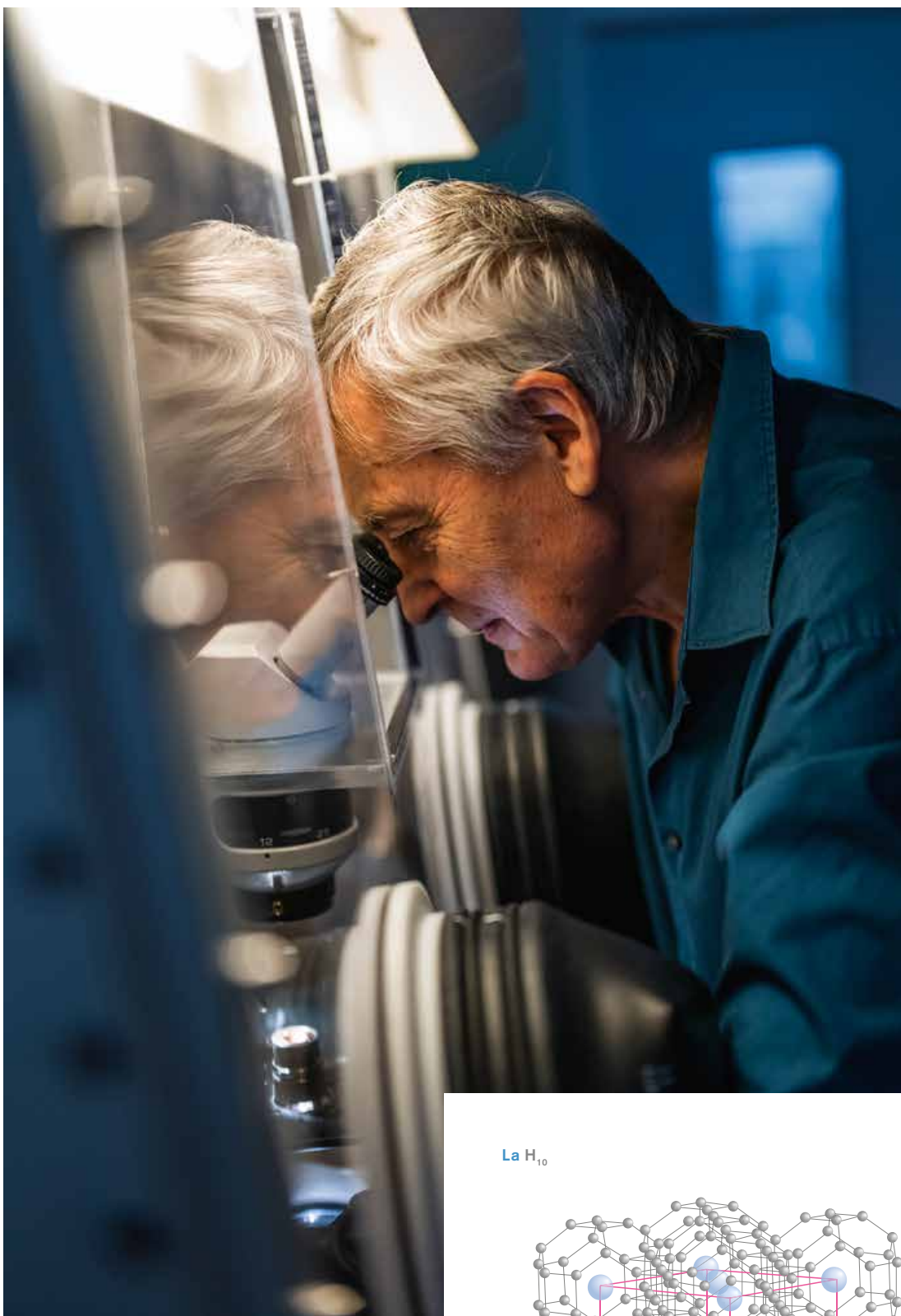
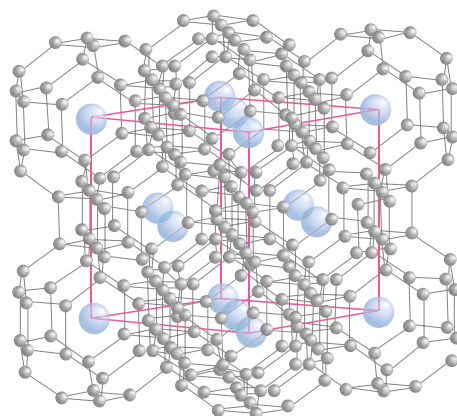
Fortschritte in der Sprungtemperatur waren möglich, weil die Forschenden auf wasserstoffreiche Materialien bauen. Diese müssen sie bisher jedoch unter einen Druck von mehr als einer Million bar setzen.

Wasserstoffhaltige Verbindungen, die den Druck gewissermaßen durch ihre Struktur aufbauen, könnten einer Supraleitung bei praxistauglichen Temperaturen und Drücken näher kommen. Einen weiteren Ansatz bieten Materialien, deren Atome wie in metallischem Wasserstoff mit hoher Frequenz schwingen.

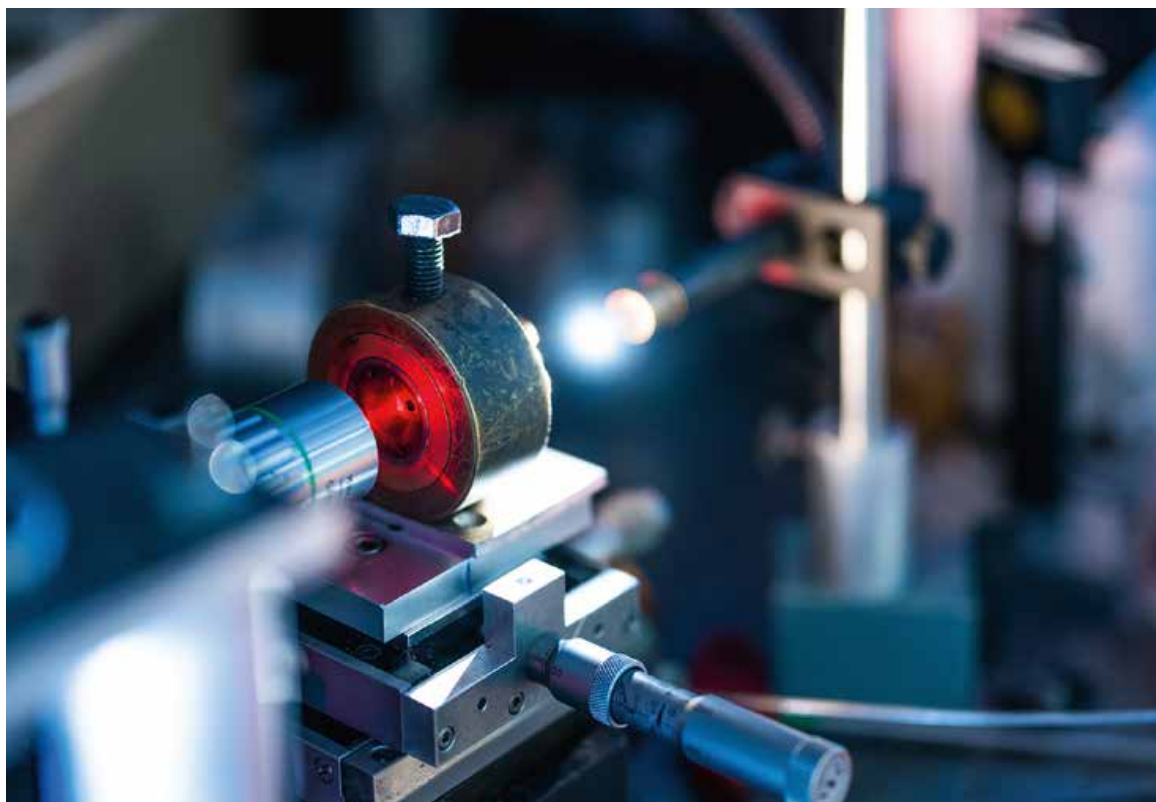
---

FOTO: JAN HOSAN; GRAFIK: MIKHAIL EREMET'S

Besondere Atmosphäre: Mikhail Eremets belädt in einer Handschuhbox unter Luftausschluss eine Stempelzelle mit einer Probe. An Lanthanhydrid ( $\text{LaH}_{10}$ , unten rechts), das aus vielen Wasserstoffatomen (grau) und einigen Lanthanatomen (blau) besteht, beobachtete sein Team eine rekordhohe Sprungtemperatur von minus 23 Grad.

 $\text{LaH}_{10}$ 

Optisches Manometer: Die Mainzer Forschenden bestimmen den Druck in einer Diamantstempelzelle, indem sie mithilfe eines Lasers messen, wie sich das Raman-Spektrum der aufeinandergespressten Diamanten verändert.



30

Experiment mit einer schwereren Wasserstoff-Variante wiederholt: mit Deuterium. Dessen Atomkern besteht aus einem Proton und einem Neutron. Da nun die Masse des Kerns etwa doppelt so groß ist, müsste die Supraleitung schwerer zu erreichen sein – die Sprungtemperatur also deutlich sinken. Genau das beobachteten die Forscher:  $D_3S$  wurde erst bei minus 120 Grad Celsius supraleitend.

## Eine neue Spur

Das führte die Mainzer Forschenden zum nächsten Schritt: Wenn Wasserstoff der Schlüssel ist, sollten Verbindungen mit besonders hohem Anteil an diesem Element die höchsten Sprungtemperaturen aufweisen. Das Team wählte Lanthanhydrid. Darin kommen auf ein Atom von Lanthan, einem Metall der Seltenen Erden, beachtliche zehn Wasserstoffatome. „Im Grunde ist es metallischer Wasserstoff, in den Lanthanatome eingebettet sind“, sagt Eremets. Damit erreichte sein Team 2019 einen neuen Rekord bei der Sprungtemperatur: Sie lag nur noch 23 Grad unter dem Gefrierpunkt von Wasser, also bei einer Temperatur, wie sie in an einigen sehr kalten Wintertagen hierzulande beinahe erreicht wird. Allerdings war hierfür noch ein hoher Druck von 1,7 Megabar nötig. Das Fachmagazin *Nature* zählte die Arbeit zu seinen zehn wichtigsten Publikationen des Jahres 2019. Im Jahr darauf präsentierten Forschende der University of Rochester im US-Staat New York eine Sprungtemperatur von 15 Grad Celsius, also fast Raumtemperatur – in einer Ver-

bindung von Wasserstoff, Schwefel und Kohlenstoff, die sie unter den vergleichsweise hohen Druck von 2,7 Megabar setzten. Eremets sieht die Arbeit seiner US-Kollegen allerdings skeptisch: „Nach zwei Jahren ist das Ergebnis immer noch nicht von einer anderen Gruppe reproduziert worden.“

Dennoch weist die Arbeit aus Rochester in die richtige Richtung: Die Kombination aus drei Elementen birgt eine Aussicht auf Supraleitung bei Raum- und sogar noch höheren Temperaturen. Dies hat ein Team um Simone Di Cataldo von der Universität Graz in einer Modellrechnung für eine Verbindung aus Bor, Lanthan und Wasserstoff gezeigt. Demnach bilden Bor und Lanthan ein Kristallgitter für sich, in das metallischer Wasserstoff als zweites Atomgitter eingeflochten ist. Das erste Gitter stabilisiere das zweite, schreiben die Forschenden. Der Stoff verliere schon bei 0,5 Megabar den elektrischen Widerstand, wie die Modellrechnung zeige; dies allerdings bei einer ziemlich niedrigen Temperatur von etwa minus 147 Grad Celsius. Andere Modellrechnungen wiederum ergeben für eine Verbindung aus Lithium, Magnesium und Wasserstoff eine äußerst hohe Sprungtemperatur von fast 100 Grad Celsius, allerdings bei einem Druck von 2,5 Megabar. Eine Kombination, die einen niedrigen Druck mit hoher Sprungtemperatur vereint, ist jedoch noch nicht gefunden worden. Und eine solche Kombination wird man so schnell wahrscheinlich auch nicht finden: „Es wäre illusionär zu glauben, dass man mit chemischem Druck zum Ziel kommt“, sagt Mikhail Eremets. Sein Team will daher verstehen, wie Supraleitung in den

Wasserstoffverbindungen zu-  
stände kommt. Dadurch könnte es  
dann Hinweise für weitere Studien  
geben. „Wir wissen jetzt bereits,  
dass hohe Schwingungsfrequen-  
zen im Kristallgitter wichtig sind“,  
sagt Eremets. Und dieses Wissen  
könnte man bei der Suche nach ein-  
em idealen Stoff anwenden. Der  
Forscher zeigt auch gleich einen  
Ansatz: Diamant enthält sehr steife  
chemische Bindungen zwischen  
Kohlenstoffatomen, die ähnlich  
schnell schwingen wie die in metal-  
lischem Wasserstoff. „Allerdings  
ist Diamant ein elektrischer Isolator“,  
sagt Eremets. Um als Supraleiter zu  
funktionieren, müsste er erst lei-  
tend gemacht werden. „Möglicherweise  
durch die Zugabe geringer Mengen  
von Fremdatomen“, schlägt  
Mikhail Eremets vor.

Zum Raumtemperatursupraleiter bei  
Normaldruck ist also noch eine ziemliche  
Strecke zu gehen. Reinhold  
Kleiner von der Universität Tübingen  
ist immerhin verhalten optimistisch.  
„Wenn Theoretiker und Experimentatoren  
weiter so gut zusammenarbeiten, werden  
wir Supraleitung auch in anderen Systemen  
sehen“, sagt der Physiker. Er zeigt sich  
indessen skeptisch, dass das bei Normal-  
druck funktioniert, und ergänzt: „Jetzt  
freue ich mich erst einmal über die systema-  
tische Suche und was mit ihr erreicht  
worden ist.“

🔊 [www.mpg.de/podcasts/druck](http://www.mpg.de/podcasts/druck)



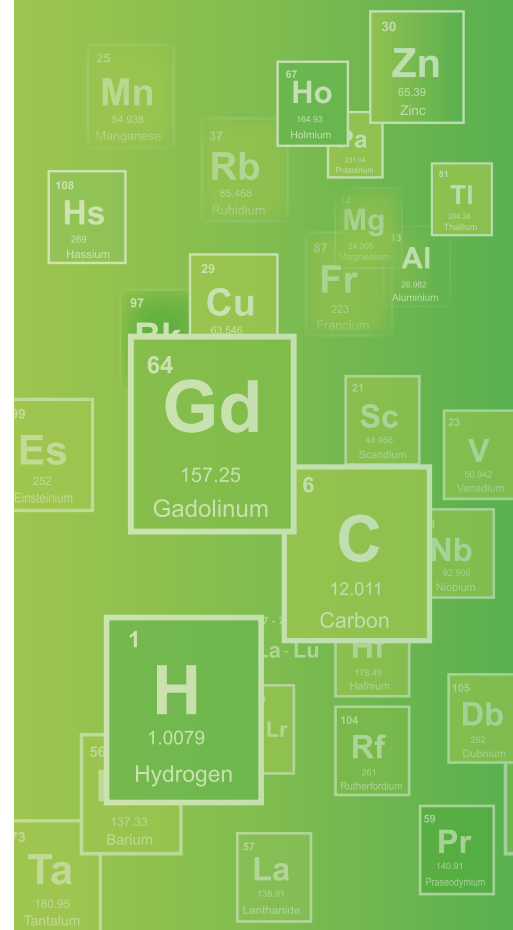
D A S  
K A R R I E R E  
P O R T A L

## 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](http://www.gdch.de/karriere)



Unter Leistungsdruck: Eine Prüfung ist für die meisten Menschen mit Stress verbunden. Doch das kann auch positive Folgen haben: Man wird wacher und konzentrierter, Aufmerksamkeit und Reaktionsvermögen steigen.



# STRESS LASS NACH

TEXT: JAN SCHWENKENBECHER



FOTO: PICTURE ALLIANCE / SZ PHOTO | MARCO EINFELDT

Die Stressreaktion des menschlichen Körpers ist eine Art Notfallprotokoll aus der Steinzeit. Zu unserer heutigen Lebensweise passt sie nur bedingt. Was bei Stress im Körper passiert, wer besonders anfällig ist und wann ein besonders schlechter Zeitpunkt für großen Stress ist – daran forschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in den Max-Planck-Instituten für Psychiatrie und für Kognitions- und Neurowissenschaften.

Stress in der Zellkultur: Mithilfe von Gehirnorganoiden untersuchen Forschende die Auswirkungen von Stresshormonen auf die Gehirnentwicklung. Ein solches Organoid besteht aus neuronalen Vorläuferzellen (grün) und neu entstandenen Neuronen (grau).

Nur zehn Minuten Vorbereitungszeit? Dann soll ich einen Fünf-Minuten-Vortrag darüber halten, warum ich der geeignete Kandidat für diese Stelle bin? Ohne Merktzettel. Und das vor diesen zwei Psychologen in weißen Kitteln, beide Experten für nonverbales Verhalten, die mich regungslos beobachten. Audio und Video werden auch aufgenommen und analysiert. Und dann noch weitere fünf Minuten mittelkomplizierter Mathe-Aufgaben. Ach du meine Güte! Klingt nicht gerade nach einem gemütlichen Spaziergang am Feldrand. Das klingt eher nach maximalem Stress.

Und das soll es auch. Die Situation stammt aus dem Skript des Trier Social Stress Test, kurz TSST. Und dieser Test hat nur ein Ziel: Stress auslösen. Das klappt mit ihm besonders gut, denn die Testsituation vereint drei zentrale Komponenten von psychosozialen Stress: Neuheit, Unkontrollierbarkeit und Bedrohung für das Ego, das heißt, es geschieht etwas, das negativ für das eigene Selbstbild oder das Selbstwertgefühl ist. Psychologen und Stressforscherinnen nutzen den TSST, wenn sie Stress in wissenschaftlichen Studien simulieren wollen. Eine von ihnen: Veronika Engert vom Leipziger Max-Planck-Institut für Kognition- und Neurowissenschaften. Engert ist Psychologin, sie ist Professorin für Soziale Neurowissenschaft am Universitätsklinikum Jena, und am Max-Planck-Institut leitet sie die Forschungsgruppe „Sozialer Stress und Familiengesundheit“. Mit ihrem Team untersucht sie, wann Menschen in sozialen Kontexten Stress erleben, wie es dazu kommt und was dagegen schützen kann.

Ursprünglich ist das menschliche Stresssystem ja ein Notfallprotokoll, das uns binnen Sekunden mit Energie flutet, damit wir eine potenziell lebensbedrohliche Situation besser meistern können. Die Sinne werden schärfer, die Muskeln stärker, die Regenerationsfähigkeit steigt. Einst rettete die körperliche Stressreaktion oftmals Leben – heute aber hat die Weltgesundheitsorganisation den Stress zu einer der größten Gesundheitsgefahren des 21. Jahrhunderts erklärt.

„Lebensbedrohliche Stressoren sind in unserer modernen westlichen Gesellschaft relativ selten geworden“, sagt Veronika Engert. „Das, was uns stresst, ist in erster Linie psychosozialer Natur.“ Das Gespräch mit dem Chef; der immer höher werdende Stapel unbezahlter Rechnungen; die Kinder aus der Kita abholen, während man ein Arbeitstelefonat führt; Stau. „Es gibt un-

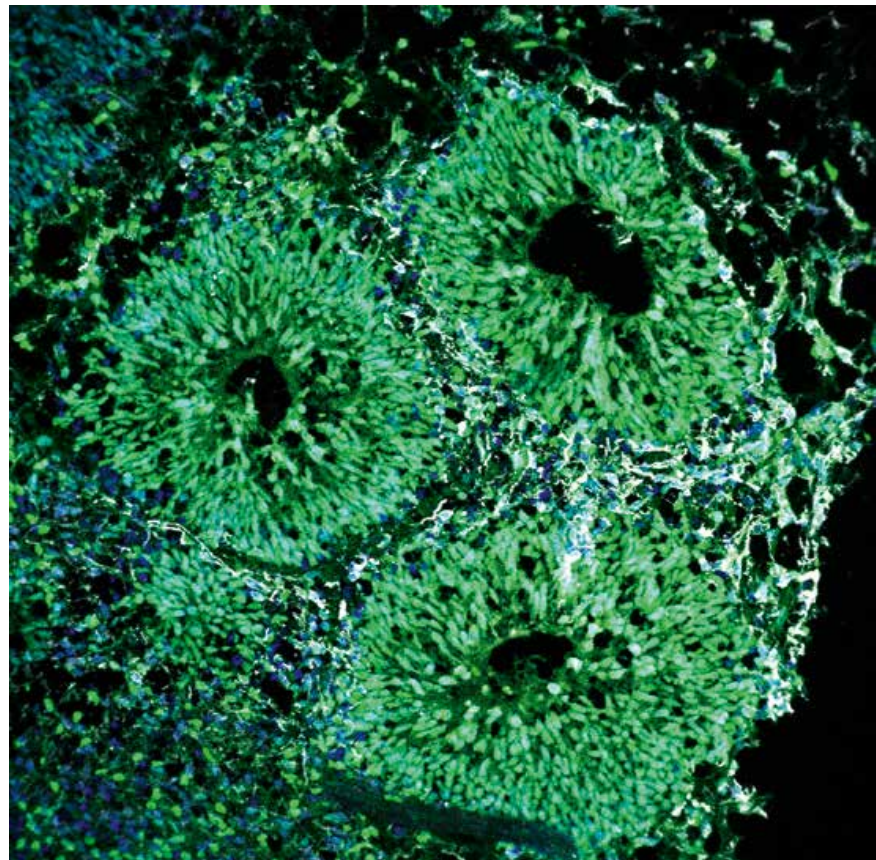


FOTO: ANTHI KRONTHRA/MPI FÜR PSYCHIATRIE

zählige kleine Dinge im Alltag, die uns stressen, und das Interessante daran ist, dass der Körper darauf genauso reagiert, als würden wir durch einen Bären bedroht“, sagt Veronika Engert. Er schüttet zahlreiche Hormone aus, kurbelt den Blutdruck an, beschleunigt die Atmung. „Die zusätzliche Energie brauchen wir aber oft gar nicht – zum Beispiel, wenn wir im Auto sitzen und im Stau stehen. Die macht uns nur verrückt, und wir werden immer noch unruhiger.“ Ein weiteres Problem: Menschen haben heute viel häufiger Stress als früher. „So, wie wir unser Leben führen, haben die meisten von uns zu oft niedrigschwellige Stress“, sagt Engert. Kleinigkeiten zwar, dafür aber viel zu viele und zu schnell hintereinander. „Bevor unser Körper

**„Die zusätzliche Energie brauchen wir aber oft gar nicht.“**

VERONIKA ENGERT

zur Ruhe kommen kann, erscheint meist schon der nächste Stressor. Dadurch sind wir ständig auf einem erhöhten Stresslevel und köcheln in einem toxischen Cocktail an Stresshormonen.“

Gestresst zu sein, das ist in erster Linie schlecht für die Gesundheit desjenigen, der den Stress gerade erlebt. Aber nicht nur. Veronika Engert hat mit ihrer Arbeitsgruppe schon mehrfach gezeigt, dass wir nicht nur dann Stress erleben, wenn wir selbst Zeitdruck, Streit, Stau oder Ärger haben. Stress erleben wir auch, wenn wir sehen, dass andere Menschen gerade gestresst sind. Vor einigen Jahren veröffentlichte Engert mit mehreren Kolleginnen und Kollegen die Ergebnisse einer Studie mit 211 Paaren – entweder Lebenspartner oder zwei Menschen, die einander fremd waren. Im Labor absolvierte jeweils einer der Partner den TSST und wurde immer gestresster, während der oder die andere dabei zuschaute – per Videoaufzeichnung oder aber durch eine auf der anderen Seite verspiegelte Scheibe. Vor und nach dem TSST nahmen Engert und ihr Team Speichelproben, in denen sie anschließend den Wert des Cortisols untersuchten. Dieses vom Körper in der Nebennierenrinde gebildete Hormon wird vor allem bei Stress ausgeschüttet und dient Forscherinnen und Forschern als biologischer Marker für den Stress, den eine Person gerade erlebt. Und wie Engert und ihr Team sahen, stieg das Cortisollevel der Beobachtenden ebenso an wie das der aktiv gestressten Partner. Das schiere Wissen darüber, wie stressig die Situation für den anderen gerade sein musste, genügte, dass auch die Beobachtenden Stress empfanden. Nach dem Besuch im Labor baten die Forschenden jene Versuchsteilnehmenden, die auch im echten Leben Partner waren, an zwei weiteren Tagen jeweils sechs Speichelproben zu nehmen und sie dem Team zuzuschicken. Und auch im Alltag zeigte sich: Hatte ein Partner Stress, war auch der andere gestresst.

„Der Stress der anderen aktiviert auch meine Stressachse“, erklärt Engert das Phänomen, das die Forschenden auch „empathischen Stress“ nennen. „Dieser Effekt tritt sogar auf, wenn mir der oder die Gestresste fremd ist“, sagt Engert. „Aber je näher mir die gestresste Person steht, desto stärker erlebe ich den Stress selbst mit.“ Nur: Was bringt es einem, sich neben dem eigenen Stress auch noch vom Stress der anderen anstecken zu lassen? „Der empathische Stress hat durchaus eine sinnvolle Funktion“, sagt Engert. „Wenn ich als Mutter zum Beispiel miterlebe, wie mein Kind gerade Stress empfindet, dann gibt mir das die Energie zu helfen.“ Oder auch umgekehrt: Gehen Mutter und Kind über die Straße und ein Auto rast heran, dann kann das Kind die Situation vielleicht noch nicht einschätzen. Aber weil es den Stress der Mutter miterlebt, gewinnt es die nötige Energie und auch die Einsicht, um schnell zur Seite zu springen.

„Der empathische Stress hat also eine wichtige, eine positive Funktion“, sagt Engert. Doch wie so oft beim Stress gibt es auch hier eine Kehrseite: „Wenn ich mir ein Kind vorstelle, das in einem Haushalt mit chronisch gestressten Eltern lebt und den Stress ständig mit abbekommt, dann kann man sich gut vorstellen, dass sich das nicht gerade positiv auf die Gesundheit des Kindes auswirkt.“ Wie schlecht Stress tatsächlich für die Gesundheit ist und bei wem der Effekt besonders stark auftritt, das zeigt die Forschung von Matthias Schmidt am Münchner Max-Planck-Institut für Psychiatrie. „Es gibt eine ganze Palette von Erkrankungen, von denen man weiß, dass Stress die Krankheitssymptome verstärkt oder sogar auslöst“, erläutert Schmidt. „Das betrifft zum Beispiel Angsterkrankungen oder Depressionen.“

Schmidt leitet die Forschungsgruppe „Neurobiologie der Stressresilienz“. Mit seinem Team untersucht er, welchen Einfluss akuter und chronischer Stress während verschiedener Entwicklungsstadien auf den Körper haben. Eine seiner Kernfragen: Wann und warum ist der eine eher resistent gegenüber Stress, wann und warum ist die andere besonders anfällig für Stress?

## Biomarker zeigen die Anfälligkeit

35

Was der Forscher schon weiß: „Zum einen spielen die Gene eine wichtige Rolle. Bei Mäusen haben wir beobachtet, dass sie, abhängig von ihrer genetischen Veranlagung, unterschiedlich auf Stress reagieren.“ Doch die Gene seien nicht allein verantwortlich. „Wir wissen auch, dass Umweltfaktoren eine ganz wichtige Rolle spielen“, sagt Schmidt. „Es ist nicht notwendigerweise so, dass jemand mit einem gewissen genetischen Background unausweichlich stressempfindlich ist. Die Gene stellen ein Risiko dar – es muss aber noch einiges hinzukommen.“ Dabei geht es nie um ein einzelnes Stressgen. Sprechen Stressforscher wie Schmidt vom „Einfluss der Gene“, dann meinen sie eine Vielzahl verschiedener Gene – jedes davon erhöht die Wahrscheinlichkeit, empfindlicher gegenüber Stress zu sein, zu einem kleinen Bruchteil.

Um Antworten auf seine Fragen zu finden, forscht Matthias Schmidt mit Mäusen. Das hat für ihn einige Vorteile: Die Schwangerschaft dauert bei Mäusen nur drei Wochen, ein paar Wochen nach der Geburt sind die Mäuse im Teenageralter. So können die Forschenden die oft längerfristigen Folgen von Stress untersuchen, ohne zwischendurch jahrelang zu warten. „Wir wollen auf diesem Weg herausfinden, welche Gene und welche Schaltkreise im Gehirn dazu führen, dass Maus eins bei einer Stressexposition eher vulnerabel ist und



Maus zwei nicht“, sagt Schmidt. „Dafür suchen wir Biomarker – also körperliche Anzeichen, die uns das vorhersagen, ohne dass wir die Maus stressen müssen.“ Als Biomarker kommen dabei ganz verschiedene Dinge infrage: Hirnstrukturen oder ganze Schaltkreise ebenso wie einzelne Gene oder bestimmte Kombinationen aus mehreren Genen. „Wir haben mittlerweile schon einige Anhaltspunkte für solche Biomarker gefunden, von denen wir wissen, dass wir die Empfindlichkeit gegenüber Stress erhöhen oder verringern können, indem wir sie manipulieren“, sagt Schmidt. Ein Beispiel: das Protein FKBP51. Es übernimmt mehrere Aufgaben im Körper, aber eine davon ist für die Forschung besonders interessant: Es beeinflusst die Sensitivität von Stresshormon-Rezeptoren. Und damit beeinflusst es die Prozesse in der Zelle, die ausgelöst werden, wenn die Stresshormone an sie binden, nachdem der Körper sie im Zuge der Stressreaktion ausgeschüttet hat. „FKBP51 scheint dabei eine ganz wichtige Rolle zu spielen“, sagt Schmidt. „Und wir wissen aus Studien am Menschen mittlerweile auch schon, dass Veränderungen in der Genstruktur des FKBP-Gens – sogenannte Polymorphismen – einen Einfluss darauf haben, wie empfindlich jemand gegenüber Stress ist, und sogar, wie groß das Risiko ist, an einer Depression zu erkranken.“

## Kinder im Mutterleib sind mitgefährdet

Schmidts Forschung hat einen unmittelbaren Bezug zur Psychiatrie. Es ist anwendungsorientierte Forschung, es ist Präventionsforschung. „Bei anderen Erkrankungen machen wir das ja auch“, sagt der Wissenschaftler. „Wenn der Arzt feststellt, dass ich einen erhöhten Blutzuckerspiegel habe, weiß ich, dass ich jetzt aufpassen und meinen Lebensstil anpassen muss. Denn wenn ich so weitermache, bekomme ich vielleicht in zwei Jahren Diabetes.“ Ganz ähnlich könne es künftig vielleicht in der Psychiatrie laufen: Kenne man das Risikoprofil zur Stressanfälligkeit einzelner Menschen, könne man gefährdeten Personen nahelegen, den Stress im Alltag zu reduzieren. So manche psychische Erkrankung könnte damit verhindert werden.

Noch mal: Stress ist nichts Schlechtes. Die Stressantwort des Körpers dient dazu, ihn innerhalb von Sekunden leistungsfähiger zu machen. Aber es kommt auf den Umfang und den Zeitpunkt des Stress an. Ein Leben unter Zeitdruck, tägliche Aufregung über die Kollegen, pausenloser Großstadtlärm – wird Stress zur Dauersituation, kann das langfristig zu Problemen führen. Und auch wenn er zum falschen Zeitpunkt kommt. Das weiß Cristiana Cruceanu, die als Postdoc ebenfalls am Münchner Max-Planck-Institut für Psychiatrie ar-

beitet, in der Abteilung „Translationale Forschung in der Psychiatrie“. Einer dieser falschen Zeitpunkte, das hat Cruceanu in einer im vergangenen Herbst veröffentlichten Studie gezeigt, liegt noch vor der eigenen Geburt. Die Forscherin arbeitet mit Gehirnanorganoiden. Das sind dreidimensionale Modelle, die, ausgehend von Stammzellen, in einer Petrischale modellieren, wie ein menschliches Gehirn heranwächst. „Es ist natürlich kein richtiges Gehirn“, sagt Cruceanu. „Aber es weist viele Merkmale eines Gehirns auf, und wir können seine Entwicklung über eine Zeitspanne verfolgen, die der Entwicklung eines Babys in der Gebärmutter während der Schwangerschaft entspricht.“ Eins zu eins vergleichen könne man das Petrischalen-Gehirn natürlich nicht mit einem realen Gehirn. Aber wenn man wisse, welche Fragen man stellen dürfe und welche nicht, könnten Hirnanorganoide einen großen Mehrwert bringen.

Cruceanu und ihre Kollegen stellten sich in der Studie folgende Frage: Was passiert, wenn ein sich entwickelndes Gehirn mit einem erhöhten Level des Stresshormons Cortisol konfrontiert ist? „Wir wissen, dass dieses Hormon eine wichtige Rolle bei der Entwicklung spielt“, sagt Cruceanu. „Wir wissen auch, dass der erhöhte Cortisolspiegel bei Müttern, die extrem gestresst sind, weil sie an einer psychischen Krankheit leiden, sich in einer Kriegssituation befinden oder im Alltag Missbrauch erleben, zu Teilen an das ungeborene Kind weitergegeben wird. Wir wollten herausfinden, ob und wie sich das auf die Entwicklung des Babys auswirkt.“ Tatsächlich sahen die Forscherinnen und Forscher, dass sich das Gehirn anders entwickelte: Es bildete deutlich mehr Nervenzellen aus. Was das bedeutet? „Es könnte ein Vorteil sein und im späteren Leben zu einer höheren Toleranz gegenüber Stress führen“, sagt Cruceanu. „Es gibt aber auch Hinweise darauf, dass es ein Nachteil ist.“ Hier seien die Grenzen des Gehirnmodells erreicht, diese Frage müsste in weiteren Studien mit anderen Methoden untersucht werden. Einige Untersuchungen, die Aufschluss geben, gibt es schon, erklärt Cruceanu. „Aus

**„Je nach genetischer Veranlagung reagieren Mäuse unterschiedlich auf Stress.“**

MATHIAS SCHMIDT



Belastungsprobe: Im Trier Social Stress Test muss sich eine Probandin einer anstrengenden Bewerbungssituation stellen. Mit der Simulation wollen Forschende neue Erkenntnisse zur Entstehung und zu den Folgen von sozialem Stress gewinnen.

früheren Arbeiten wissen wir, dass in Haushalten, in denen die Mütter Stress hatten, die Kinder häufiger an Depressionen, Autismus-Spektrum-Störungen oder anderen neurologischen Entwicklungsstörungen leiden.“ Zu viel Stress kann also nicht nur einem selbst schaden. werdende Mütter, die während der Schwangerschaft ständig oder stark gestresst sind, erhöhen wohl das Risiko für ihr Kind, später einmal anfälliger gegenüber Stress zu werden.

Und nach der Geburt, das zeigt Veronika Engerts Forschung zum empathischen Stress, geben Eltern ihren Stress ebenfalls an die Kinder weiter. Doch genau hier – beim Weitergeben des Stress – könnten die neuesten Forschungsarbeiten von Engert und ihrem Team eine Hilfe bieten. Sie untersuchen gerade, inwiefern es einen Unterschied macht, ob ein Mensch, der sieht, dass jemand Nahestehendes gestresst ist, dabei Empathie oder aber Mitgefühl erlebt. „In der Wissenschaft unterscheiden wir zwischen Empathie und Mitgefühl“, sagt Engert. „Empathie ist das reine Mitleiden mit dem anderen. Mitgefühl aber geht darüber hinaus. Wer mitfühlt, hat immer auch den Wunsch, es möge dem anderen trotz seines Leids gut gehen.“ Engert untersucht nun mit ihrem Team, ob es Kinder vor der Stressreaktion schützt, wenn sie eher Mitgefühl als

Empathie empfinden. „Wir haben ein paar vorläufige Ergebnisse, die nahelegen, dass Kinder, die besonders viel Empathie empfinden, die Stressreaktion der Mutter stärker miterleben“, sagt Engert. „Wohingegen Kinder, die in erster Linie Mitgefühl zeigen und der Mama gerne helfen möchten, den Stress selbst gar nicht so stark erleben.“ Sollten sich diese Ergebnisse verfestigen, dann wäre das ein Ansatz, auf dessen Grundlage man Stressprävention betreiben könnte. Denn Mitgefühl statt Empathie zu empfinden, das lässt sich trainieren. Besonders für Menschen, die im Carebereich arbeiten – Ärzte, Therapeuten, Pfleger –, gibt es solche Schulungen bereits. Gegebenenfalls könnten entsprechende Angebote für Familien entwickelt werden.

Dennoch folgt aus Veronika Engerts Forschung zum empathischen Stress, was sich auch aus den Arbeiten von Mathias Schmidt und Cristiana Cruceanu ableiten lässt: Die Stressreaktion hilft uns Menschen, in besonderen Situationen besonders reagieren zu können. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass diese Situationen besonders bleiben und keinesfalls zur Regel werden. Das beste Mittel gegen Stress: sich gar nicht erst damit anstecken.

[www.mpg.de/podcasts/druck](http://www.mpg.de/podcasts/druck)

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Forschende suchen nach körperlichen Anzeichen, die frühzeitig Hinweise geben, ob Stress zu psychiatrischen Erkrankungen führen kann.

Der Stress der werdenden Mutter beeinflusst die Gehirnentwicklung beim Embryo.

Das Phänomen „empathischer Stress“ führt dazu, dass Menschen im Umfeld von Gestressten ebenfalls Stress empfinden.

Wer für einen gestressten Mitmenschen statt Empathie Mitgefühl empfindet, lässt sich möglicherweise weniger vom Stress anderer anstecken.

# KNOCHENARBEIT

TEXT: CATARINA PIETSCHMANN

38

Das Skelett gibt dem Körper Halt. Doch dieses Gerüst ist alles andere als statisch: Ständig werden Knochen erneuert und bei mechanischer Belastung umgebaut. Was dabei genau geschieht und welche Struktur die Knochen steif und fest macht, untersuchen Richard Weinkamer und Wolfgang Wagermaier am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung. Ihre Erkenntnisse könnten auch für die Medizin und die Materialwissenschaft relevant werden.

FOTO: DAVID AUSSERHOFER



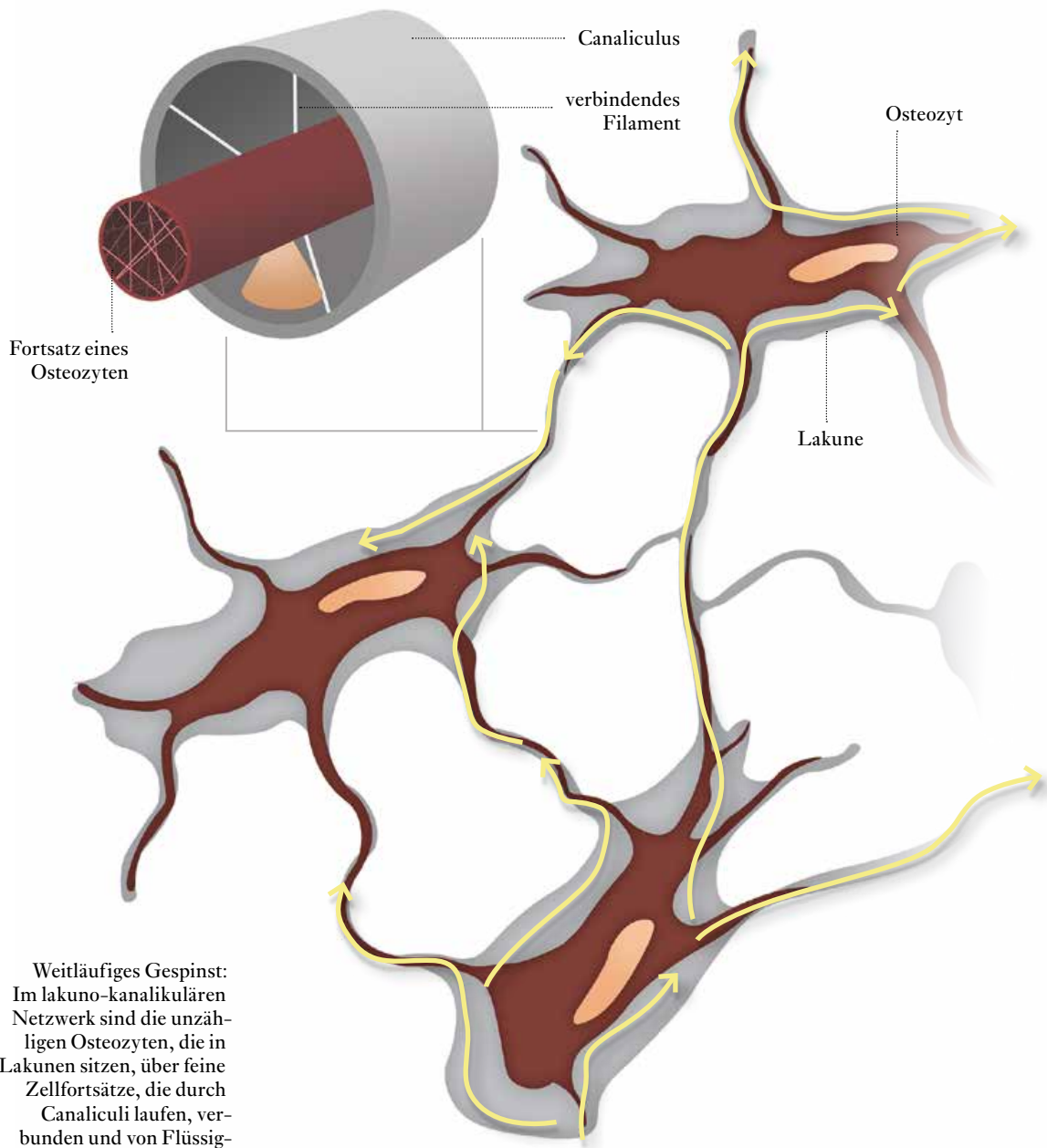
Durchleuchtet: Das Potsdamer Team untersucht mit diversen Methoden die Struktur von Knochengewebe – zum Beispiel mithilfe eines Mikrocomputertomografen. In dessen Röhre schieben die Forschenden Knochenproben. Hier ein Dünnschnitt, der für weitere Untersuchungen mit Rhodamin eingefärbt wurde.



Knochenbrüche, verkrümmte Wirbelsäulen, abgenutzte Hüftgelenke – als Chirurg an der Charité hatte er einiges gesehen. Die Röntgenstrahlung war noch nicht entdeckt, als Julius Wolff 1892 das Gesetz der Transformation der Knochen formulierte. Feine Knochen-schnitte, hergestellt mit einer Elfenbeinsäge und gegen das Licht gehalten, hatten ausgereicht zu erkennen, dass die feinen Bälkchen im Knocheninneren sich entsprechend der mechanischen Belastung umbauen. Form follows function, würde man heute sagen. Die Form folgt der Funktion. Bei der Knochenarchitektur ist die Designrichtlinie besonders wörtlich zu nehmen.

Um Spannung abzubauen und maximale Stabilität zu erreichen, reagiert Knochen aktiv und permanent auf mechanische Reize. Und zwar so, dass in stärker belasteten Bereichen Material angebaut, in entlasteten hingegen entfernt wird. Aber wie und wodurch das ausgelöst wird, darüber rätselt die Wissenschaft auch noch 130 Jahre später.

In der Abteilung „Biomaterialien“ des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam sind zwei österreichische Wissenschaftler mit modernsten Methoden tief in die Thematik eingestie-



Weitläufiges Gespinnst: Im lakuno-kanalikulären Netzwerk sind die unzähligen Osteozyten, die in Lakunen sitzen, über feine Zellfortsätze, die durch Canaliculi laufen, verbunden und von Flüssigkeit (gelbe Pfeile) umspült.

ILLUSTRATION: GCO NACH EINER VORLAGE DER MPG



## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Knochen werden ständig erneuert und umgebaut. Osteozyten und das lakuno-kanalikuläre Netzwerk spielen dabei eine zentrale Rolle.

Studien, an denen Max-Planck-Forschende beteiligt waren, belegen die Fluid-Flow-Hypothese. Demnach nehmen die Osteozyten wahr, wenn sich durch äußeren Druck die Geschwindigkeit ändert, mit der Flüssigkeit durch das lakuno-kanalikuläre Netzwerk fließt. Es mehren sich Hinweise, dass die Osteozyten und das lakuno-kanalikuläre Netzwerk auch am Recycling von Knochenmaterial beteiligt sind.

Erkenntnisse dazu, wie die Erneuerung von Knochen gesteuert wird, könnten das Verständnis von Krankheiten wie Osteoporose verbessern.

Die genaue Kenntnis des Knochenaufbaus inspiriert die Entwicklung besonders fester und steifer Materialien.

gen – und kommen der Lösung immer näher. Der eine, Richard Weinkamer, Mathematiker und Physiker, aus Interesse an der Mechanobiologie des Knochens. Der andere, Wolfgang Wagermaier, weil er als Werkstoffwissenschaftler vom natürlichen Hybridmaterial Knochen fasziniert ist. Es geht um grundlegende Erkenntnisse, die einerseits helfen, Knochenkrankheiten besser zu verstehen, andererseits aber auch zu synthetischen Materialien mit interessanten neuen Eigenschaften führen.

Knochen bestehen aus einer an sich weichen Kollagenmatrix, in die feinste Plättchen aus Calciumphosphat eingebettet sind. Dieses Konstrukt verleiht dem Material Festigkeit und Steifigkeit – aber auch eine gewisse Elastizität. „Hybridmaterialien aus Proteinen und Mineralien wie Calciumphosphat, Calciumcarbonat, Siliciumoxid oder Eisenoxid sind in der Natur weit verbreitet. Man denke an Perlmutter, Kieselalgen oder Zähne. Oder eben an Knochen“, sagt Wagermaier. „Wären die nur ein weicher Gewebshaufen, wäre Fortbewegung gar nicht möglich. Zugleich dienen Knochen dem Körper auch als Calciumreservoir.“ Ein sehr nachhaltiges Materialmanagement also, das auch äußerst sinnvoll ist. Denn die mehr als 200 Knochen eines Erwachsenen, die

etwa zehn Prozent des Körpergewichts ausmachen, sind ständig im Umbau. Über die Nahrung immer wieder neu entsprechende Mineralienmengen aufzunehmen, wäre kaum machbar.

## 30 Millionen Zellen pro Kubikzentimeter

Innerhalb von zehn Jahren hat sich ein kompakter Knochen wie etwa das Schienbein komplett erneuert. Bei schaumartigen Knochen wie den Wirbelkörpern dauert es sogar nur etwa fünf Jahre. Die Arbeit erledigen Bau- und Abrisskolonnen aus spezialisierten Zellen. Osteoblasten bauen Knochenmasse auf, Osteoklasten reißen sie wieder ein. 95 Prozent aller Knochenzellen sind jedoch Osteozyten. Als wären sie einer Novelle von Edgar Allan Poe entsprungen, sitzen sie Jahre, teils sogar Jahrzehnte lebendig eingemauert in kleinen Höhlen im Knochen – etwa 30 Millionen Zellen pro Kubikzentimeter! Weil sie an den Umbauprozessen nicht direkt beteiligt und in ihren Höhlen nur schwer zugänglich sind, hatten viele Forschende diesen Zelltyp

lange Zeit nicht auf dem Schirm. Richard Weinkamer und Wolfgang Wagermaier interessieren sich umso mehr für sie. Denn Osteozyten haben wichtige Aufgaben, die in Potsdam durch die Kombination verschiedener optischer Methoden, materialwissenschaftlicher Charakterisierungen, mathematischer Berechnungen und Simulationen erforscht werden. Osteozyten sind zum Beispiel am Mineralhaushalt beteiligt, schütten sogar Hormone aus und dienen als Drucksensoren, wie die Forscher kürzlich herausgefunden haben.

Manche ihrer Funktionen können die Osteozyten nur ausüben, weil sie in einem knöchernen Gefängnis sitzen. Und dorthin gelangen sie durch eigenes Zutun. „An diesen Stellen haben Osteoklasten irgendwann einmal kleine Tunnel in den Knochen gefressen. Dann kamen Osteoblasten, mauerten sie Schicht für Schicht wieder zu, sich dabei selbst mit ein und differenzierten zu reifen Knochenzellen – den Osteozyten“, erklärt Richard Weinkamer.

## Das Netzwerk der Osteozyten

Um die eingesperreten Osteozyten zu untersuchen, sägen die Forschenden zunächst eine Probe aus einem Knochen heraus, betten sie in Kunststoff ein und betrachten sie im Elektronenmikroskop. Als Erstes fallen große dunkle Flecken auf. Es sind Kanäle, die den Knochen durchziehen und durch die Blutgefäße laufen. Sie sind umgeben von den Osteonen, konzentrischen Strukturen ähnlich den Jahresringen einer Baumscheibe und nur eine Nuance dunkler als der helle Teil der Knochenprobe. „Hier um den Blutkanal herum ist der Knochen noch jünger und weniger stark mineralisiert“, erklärt Wolfgang Wagermaier. „Die kleinen, dunklen Flecken mittendrin sind die Lakunen. Und in diesen etwa 15 Mikrometer langen, ovalen Höhlen sitzen die Osteozyten.“

Schaut man sehr genau hin, erkennt man bereits eine feine Struktur, die von den Blutgefäßen weg nach außen verläuft: ein Labyrinth aus Kanälen. Wenn die Forscher die Knochenprobe nun in eine Lösung mit dem fluoreszierenden Farbstoff Rhodamin eintauchen und dann unter ein konfokales Laserrastermikroskop legen, wird die helle, filigrane Struktur auf schwarzem Grund ganz deutlich, wie feinstes Häkelmuster: das lakuno-kanalikuläre Netzwerk. Auch wenn die Zellkörper der Osteozyten fest in den Lakunen sitzen, sind sie über das Kanalnetzwerk und bis zu 80 fingerartige Zellausstülpungen mit ihren Nachbarzellen verbunden. Es erinnert an das neuronale Netzwerk im Gehirn. „Mit dem Färbemittel gelangen wir in Bereiche, die uns sonst nicht zugänglich wären. Es bedeckt die gesamte innere Oberfläche des Höhlensystems und wird

durch den Laser zur Fluoreszenz angeregt“, erklärt Wagermaier. Knochen ist nicht transparent, aber ein wenig lässt sich auch mit einem Lichtmikroskop hineinschauen. Mit konfokaler Mikroskopie, bei der ein gebündelter Laserstrahl die Probe abrastert, lassen sich Bilder von verschiedenen Schichten eines Knochens machen und zu einem 3D-Bild zusammensetzen. Dadurch erhalten die Forschenden Einblicke bis in eine Tiefe von 40 Mikrometern, die ihnen detaillierte Informationen über die Dichte und die Konnektivität des lakuno-kanalikulären Netzwerks liefern. Um dessen Ausmaß zu quantifizieren, zog Mathematiker Weinkamer es virtuell aus dem Knochenmaterial heraus und ließ den Computer rechnen. „Würde man die Kanälchen aus nur einem Kubikzentimeter Knochen aneinanderreihen, würden sie sich zu einer Strecke von etwa 74 Kilometern summieren! Das ist wirklich spektakulär.“

Das Gesetz von Julius Wolff besagt, dass Knochen genau dort verstärkt wird, wo es mechanisch nötig ist. Aber wo befindet sich der Sensor, der diesen Prozess steuert? Dass Zellen mechanisch sensitiv sind, ist bekannt. Doch der Druck, der von außen auf den recht steifen Knochen wirkt und diesen kaum deformiert, ist nicht ausreichend, um Osteoblasten und Osteoklasten zu aktivieren. Die Osteozyten könnten hier eine wichtige Rolle spielen – so die bereits Anfang der 1990er-Jahre formulierte Fluid-Flow-Hypothese. Die Idee: Das gesamte Netzwerk aus Kanälchen und Höhlen der Osteozyten ist mit Flüssigkeit gefüllt. „Es ist im Grunde wie bei einem nassen Schwamm. Drückt man ihn zusammen, geht die Flüssigkeit dorthin, wo sie rauskann. Bei mechanischer Belastung des Knochens wird die Flüssigkeit des Netzwerks in die breiten Kanäle um Blutgefäße gedrückt“, erklärt Weinkamer. Die Osteozyten spüren die Kräfte der Flüssigkeit, wenn diese über ihre Oberfläche spült. Grob gilt: Je stärker der Knochen belastet wird, desto schneller fließt die Flüssigkeit. „Und diese Information geben die Osteozyten über das Netzwerk bis an die Knochenoberfläche weiter. Dort sitzen die Osteoblasten und Osteoklasten und übernehmen dann.“

## Knochentraining für Mäuse

Testen ließ sich die Hypothese jetzt, weil die Potsdamer Forschenden das Kanalnetz im Knochen abbilden konnten. Mit seiner Kollegin Bettina Willie von der McGill University im kanadischen Quebec untersuchte Weinkamer dafür drei genetisch identische Mäuse. Die Nager wurden narkotisiert, eines ihrer Hinterbeinchen wie im Fitnessstudio in eine Beinpresse gelegt und ein wenig mechanischer Druck auf die Längsachse ausgeübt. Das untrainierte zweite Bein diente als Kontrolle. Anschließend wurden die Nager für Knochenaufnahmen in den Computertomografen

geschoben und wieder aufgeweckt. Das ganze Prozedere durchliefen die Mäuse mehrmals. Die Auswertung aller Daten ergab ein genaues Bild davon, wo nach dem Fitnessstraining neuer Knochen gebildet wurde und wo nicht.

Das Potsdamer Team untersuchte dann detailliert die lakuno-kanalikulären Netze mit mehreren Millionen kleiner Kanälchen in den Knochen der drei Mäuse. Anhand der Netzwerkdaten berechneten die Forschenden anschließend den Flüssigkeitsfluss durch die Netzwerke. Auf diese Weise lässt sich simulieren, wo am Querschnitt des Mäusebeins Knochen zuwachsen müsste und wo mit Schwund zu rechnen war. Und tatsächlich: Die Umbauten traten genau dort auf, wo die Simulation es vorhersagte. Mithilfe des Knochenstrainings für die drei kanadischen Mäuse konnten die Forschenden also belegen, dass der mechanische Sensor im Knochen tatsächlich so funktioniert wie von der Fluid-Flow-Hypothese vorhergesagt. Dabei hatten die Knochen der drei Mäuse zwar alle auf das Training reagiert – aber unterschiedlich stark. Warum, das fand Richard Weinkamer heraus, als er anhand von Proben der entscheidenden Knochenbereiche die Kanalnetzwerke haargenau verglich. Berechnungen zur Fließgeschwindigkeit ergaben, dass die Netzwerkarchitektur von Maus zwei, die im Training weniger Knochen zulegte, nur einen langsameren Flüssigkeitsfluss zuließ.

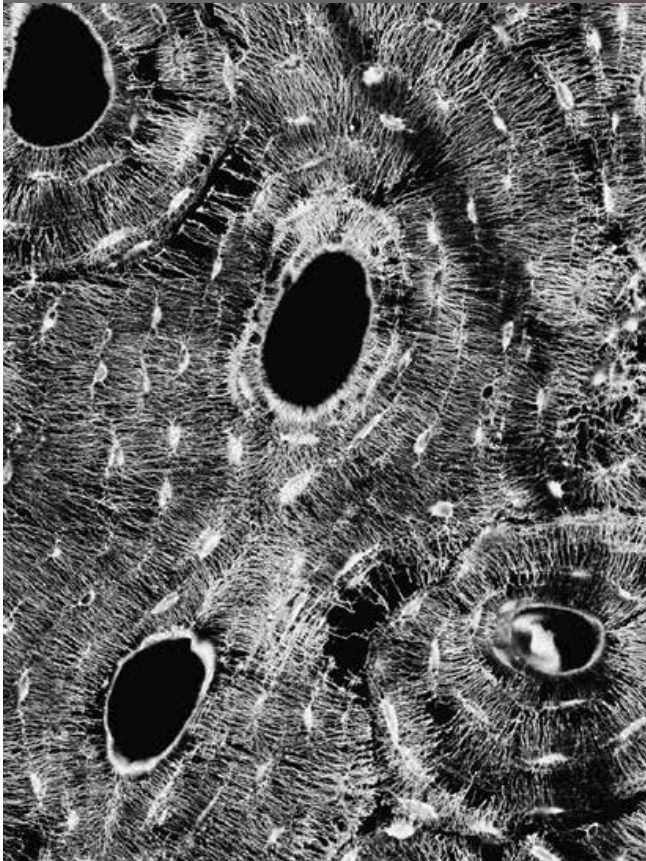
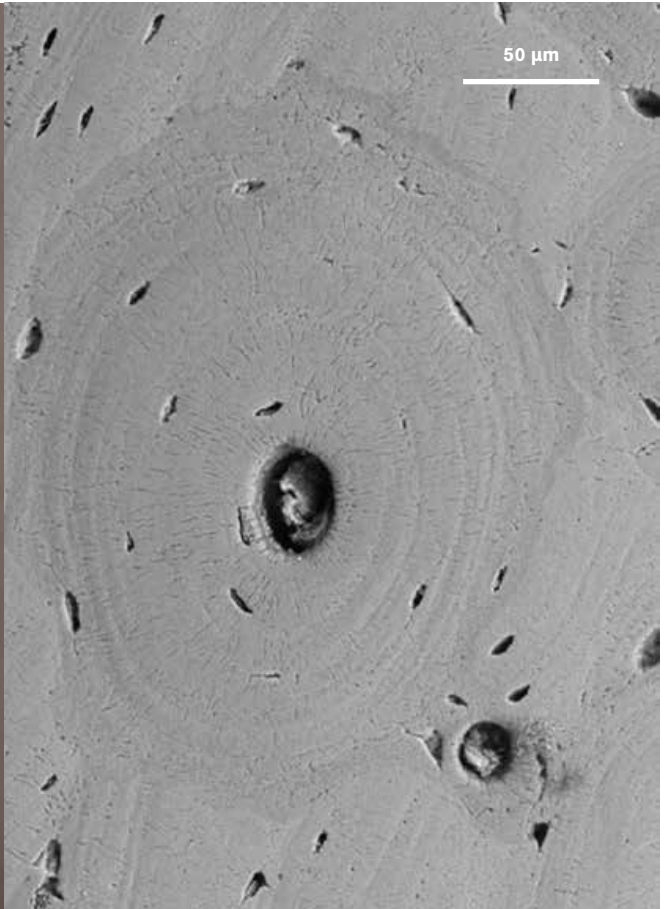
Die Knochenbildung vom Embryo bis hin zum ausgewachsenen Wirbeltier folgt einem ausgeklügelten Programm. Der ständige Umbau ist von Anfang an Teil davon. „Alles beginnt mit einer Knorpelanlage. Sobald ein wenig Knochen da ist, wird von innen etwas ab- und außen angebaut“, erklärt Richard Weinkamer. „So vergrößert sich peu à peu der Radius eines Kno-

Zoom in Knochen eines Pferdes (oben links): Im Rasterelektronenmikroskop werden in einem Schnitt durch einen Oberschenkelknochen die größeren kreisförmigen Öffnungen für Blutgefäße und die kleineren Hohlräume der Lakunen sichtbar (oben rechts). Im konfokalen Laserrastermikroskop treten durch den Zusatz von Rhodamin die Kanäle des lakuno-kanalikulären Netzwerks hervor (unten links). Mikroskopie mit polarisiertem Licht zeigt, dass die Kollagenfasern ringförmig um die Blutgefäße angeordnet sind (unten rechts).

→

**„Würde man die Kanälchen aus nur einem Kubikzentimeter Knochen aneinanderreihen, würden sie sich zu einer Strecke von etwa 74 Kilometern summieren.“**

RICHARD WEINKAMER



FOTOS: SCIENCE PHOTO LIBRARY, MPI FÜR KOLLOID- UND GRENZFLÄCHENFORSCHUNG (2), KERSCHNITZKI, WAGERMAIER ET AL., J. STRUC. BIOL. 2011, CELLS TISSUES ORGANS 2011 (VON LINKS OBEN IM UHRZEIGERSINN)

chens. Das Längenwachstum ist etwas komplizierter.“ Das Calciumphosphat wird dabei in einem zweistufigen Prozess abgebaut. Zuerst lösen die Osteoklasten mit Säure das Mineral heraus. Dazu entwickeln sie gewissermaßen Finger – winzige Zellausstülpungen, die sie regelrecht in das Material eintauchen. Im zweiten Schritt wird die Kollagenmatrix enzymatisch zerschnitten. Doch wie kommen die Osteoblasten wieder an das Baumaterial? Nach dem Transportweg für das Calciumphosphat suchen Wagermaier und Weinkamer gerade. „Offenbar passiert da eine Art Recycling. Das Mineral wird zum Teil in Vesikeln verpackt. Wir suchen unter dem Elektronenmikroskop nach diesen Vesikeln und führen Berechnungen durch, wie viele durchgeschickt werden müssten, um den Knochen zu mineralisieren“, erklärt Weinkamer. Inzwischen häufen sich die Hinweise auch aus der Forschung des Potsdamer Teams, dass die Osteozyten bei der Regelung des Mineralhaushalts ebenfalls mitmischen. Der Ab- und Einbau des Calciumphosphats, die sogenannte Mineralhomöostase, scheint jedenfalls ein sehr aufwendiger Prozess zu sein. „Das lakuno-kanalikuläre Netzwerk könnte auch dazu dienen, dass das Mineral herausgelöst wird, ohne die Kollagenmatrix komplett zu zerstören“, meint Wolfgang Wagermaier.

44 Störungen bei der Mineralisierung und Demineralisierung des Knochens sind die Ursache vieler Knochenkrankheiten. Zum Beispiel bei Osteoporose oder der Glasknochenkrankheit *Osteogenesis imperfecta*. An Mausmodellen, die bestimmte genetische Defekte haben, die menschlichen Knochenkrankheiten ähneln, versuchen Forscherinnen und Forscher weltweit etwas über diese Erkrankungen zu lernen – und mögliche Therapiesansätze zu erkennen.

Während Richard Weinkamer sich auf die Lakunen und das Kanalgespinnst konzentriert, interessiert sich der Materialwissenschaftler Wolfgang Wagermaier vor allem für die Bereiche, die unter dem konfokalen Laserrastermikroskop schwarz erscheinen: das kompakte Knochenmaterial, das das Kanalnetz umgibt wie der Fels eines Berges ein Höhlensystem. Um es sichtbar zu machen, beschießt Wagermaiers Team am Elektronenspeicherring Bessy II in Berlin-Adlershof Proben mit kurzweiliger Röntgenstrahlung. So entstehen Streubilder, aus denen sich die Größen der Mineralpartikel in der Kollagenmatrix ermitteln lassen. Als Bio-Inspiration für neue Materialien sucht Wagermaier nach Zusammenhängen zwischen den Materialparametern – den Orientierungen der Kollagenfasern oder den Größen der Mineralpartikel etwa – und der Architektur des lakuno-kanalikulären Netzes. In polarisiertem Licht sieht man die ringförmige Struktur der Kollagenmatrix. Schaut man mit Kleinwinkel-Röntgenstrahlung tiefer in die Struktur, so erkennt man die Kollagenfibrillen. Noch mehr Details liefert die Weitwinkel-Röntgenstreuung. „Jede Fibrille enthält viele

Kollagenmoleküle, die erstaunlich regelmäßig angeordnet sind“, sagt Wagermaier. „Jedes einzelne Kollagenmolekül ist zu einer etwa 300 Nanometer langen Tripelhelix verdrillt. Zwischen den Kollagenhelices befinden sich Lücken von etwa 40 Nanometern.“ In diesen Lücken beginnen die Mineralplättchen zu wachsen, die – je nach Knochentyp – zwei bis sieben Nanometer dick werden.

## Kunststoff mit mineralischen Nanopartikeln

Die Kombination aus weichen Fasern und harten Partikeln optimiert auch synthetische Materialien. So ergab eine Studie mit Hans Börner von der Humboldt-Universität zu Berlin, dass mineralische Nanopartikel, die mit einer Art Klebstoff an den Grenzflächen in eine Polymermatrix eingebunden werden, den Kunststoff deutlich fester und steifer machen. Beim Aufbau der Knochenstruktur, die der Werkstoffwissenschaft als Vorbild dient, leisten die Osteoblasten Feinstarbeit. Die Auswirkungen davon sind aber häufig auch makroskopisch sichtbar. „Tennisspieler, die regelmäßig auf den Platz gehen, haben im Schlagarm mehr Knochenvolumen“, sagt Wagermaier. Und bei Windhunden, die in Rennen immer wieder im Kreis laufen, sind die Knochen der äußeren Beine oftmals etwas dichter als die der inneren. Generell gilt für Knochen: Fehlt der mechanische Reiz, dann schwindet Masse. Ein Problem, das nicht nur durch Bewegungsmangel im Alter auftritt, das vielmehr auch Astronauten während langer Raumflüge zusetzt. Bei Probanden, die für

FOTO: DAVID AUSSERHOFER



**„Tennisspieler haben im Schlagarm mehr Knochenvolumen.“**

WOLFGANG WAGERMAIER



Probe für den „Nanostar“: Der Techniker Daniel Werner bereitet eine Messung der Röntgenkleinwinkelstreuung vor, um die Größe der Mineralpartikel im Knochen zu bestimmen.

45

eine Nasa-Studie vier Wochen das Bett nicht verlassen durften, schwand neben der Muskel- auch Knochenmasse. Wie stark, das war individuell verschieden. Weinkamer und Wagermaier vermuten, dass, wie bei den Mäusen, Unterschiede in der Netzwerkstruktur der Knochen eine Rolle spielen.

Knochen können sich lebenslang umbauen und erneuern. Trotzdem geht es ab etwa dem 35. Lebensjahr mit der Knochendichte bergab. „Warum, das wissen wir nicht. Vielleicht wird auch das Mechanosensing-System der Knochen mit zunehmendem Alter unempfindlicher? Genau wie unsere anderen Sinnesorgane – die Augen, die Ohren – schwächer werden“, sagt Wagermaier. Prophylaktisch mit Medikamenten nachzuhelfen hält er nicht für sinnvoll. Lieber durch Bewegung und leichtes Krafttraining gegensteuern. So lässt sich der Druck auf die Knochen aufrechterhalten, damit ihre Restaurierung bis ins hohe Alter nicht ins Stocken gerät.

[www.mpg.de/podcasts/druck](http://www.mpg.de/podcasts/druck)




---

## GLOSSAR

**LAKUNO-KANALIKULÄRES NETZWERK** heißt das Mikrometerfeine Kanalsystem, das den Knochen durchzieht. Es verbindet die Lakunen, in denen die Osteozyten sitzen, und ist mit Flüssigkeit gefüllt.

**OSTEOBLASTEN** sind Zellen, die Kollagen und Calciumphosphat ausscheiden und so die Knochensubstanz aufbauen.

**OSTEOKLASTEN** bauen Knochensubstanz ab und stellen das Material zum Neuaufbau zur Verfügung.

**OSTEOZYTEN** gehen aus Osteoblasten hervor und sitzen in den Lakunen des lakunokanalikulären Netzwerks.

---

Logische Verfahren helfen dabei, komplexe mathematische Probleme auf dem Computer zu knacken. Damit macht die Logik die Rechner klüger und schneller. Sie kann sogar die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine auf ein ganz neues Niveau heben. Christoph Weidenbach vom Max-Planck-Institut für Informatik entwickelt seit dreißig Jahren solche vielversprechenden logischen Verfahren, die er auch am eigenen Rennwagen testet.

TEXT: TIM SCHRÖDER

Christoph Weidenbach mag schnelle Gefährte. Er hat einen Opel Speedster – einen gut 900 Kilogramm leichten Roadster. Weidenbach öffnet das Garagentor. Blitzsauber ist es in dem Raum. Drinnen steht der Flitzer, glänzend bis auf ein paar Insektenreste an der Front. Und gelb-schwarz lackiert – „wie die Biene Maja“, sagt Weidenbach lächelnd. Der Wissenschaftler wohnt in einem kleinen Weinort südlich von Mainz. Wenn er seinen Speedster richtig ausfahren will, dann kurvt er durch die Weinberge bis zur nahe gelegenen Autobahnauffahrt und von dort noch etwa anderthalb Stunden an Koblenz vorbei hoch in die Eifel zum Nürburgring.

Die Nordschleife des Nürburgrings, die sich auf 20 Kilometern über die Hügel und durch den Wald schlängelt, gilt als anspruchsvollste Rennstrecke der Welt. Alle Automobilhersteller testen hier ihre Sportwagen. Auch Privatleute dürfen mit ihren Autos über den Asphalt brettern. „Die Nordschleife ist wie Achterbahnfahren“, sagt Christoph Weidenbach. „Nur dass man selbst lenkt. Dieses Jahr werde ich zum ersten Mal meine vierjährige Tochter auf die Nordschleife mitnehmen.“ Zusammen mit seinem Bruder hat Weidenbach den Speedster vor einigen Jahren getunt, das komplette Auto inklusive Motor zerlegt und neu auf-

gebaut. Er hat einen Kompressor hinzugefügt, der die Luft für die Verbrennung mit Druck in die Brennkammer jagt. Vorher war ihm der Wagen zu langsam. Jetzt hat er fast 300 PS, doppelt so viel wie das Serienmodell. Sein Vater hatte ein Autohaus – ebenfalls Opel. Kein Wunder, dass Christoph Weidenbach schon mit zwölf Jahren Auto fahren konnte.

Kfz-Mechaniker ist er zwar nicht geworden, trotzdem hat seine Forschung über die Jahre immer wieder etwas mit dem Auto zu tun gehabt. Der Wissenschaftler arbeitet am Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken. Er leitet die unabhängige Forschungsgruppe „Automation of Logic“. Deren Ziel ist es, komplexe Sachverhalte logisch zu beschreiben, um sie zu automatisieren, um Computer in die Lage zu versetzen, die damit verbundenen Probleme von allein zu lösen. Das erinnert ein wenig an Computer, die Schach spielen können. Nur ist Christoph Weidenbachs Ansatz deutlich komplizierter.

Im Allgemeinen sind die Probleme, für die er mit seinem Team Verfahren entwickelt, „beweisbar nicht lösbar“. Das heißt, dass diese Probleme beliebig schwierig sind und jenseits dessen, was ein Computer berechnen kann. Gerade deshalb ist es wichtig, die neuen Verfahren auf realen Anwendungen zu testen, von denen man weiß, dass sie sich prinzipiell lösen lassen. So fahren Weidenbachs Forschungsergebnisse quasi in seinem Speedster mit: Er hat das Motorsteuergerät des Wagens logisch modelliert. Solche Steuergeräte regeln, wie viel Luft in den Motor gelangt oder wie viel Benzin eingespritzt wird. Herkömmliche Steuergeräte tun einfach das, was man ihnen einprogrammiert hat. Christoph Weidenbachs Version kann dank der Logik selbst überprüfen, was sie gerade tut, in Bruchteilen von Sekunden auswerten, ob das gut

—>

# BESUCH BEI

---

CHRISTOPH WEIDENBACH



FOTO: ANNA ZIEGLER

47

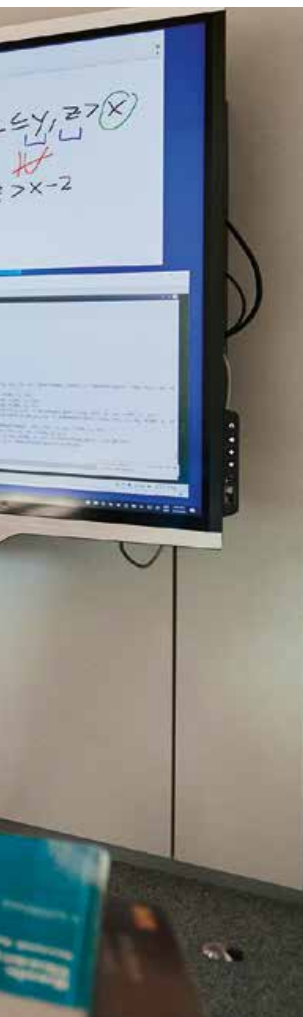
Fokussiert im Cockpit: Christoph Weidenbach und sein Team entwickeln Verfahren für Logikprogramme, die dann komplexe technische Systeme sicherer, effizienter und sich selbst erklärend steuern – etwa den Motor eines Opel Speedster.



FOTOS: ANNA ZIEGLER







Ideenschmiede:  
Christoph Weidenbach  
und sein Kollege Martin  
Bromberger denken  
darüber nach, wie sie  
ihre Methoden anhand  
der Modellierung eines  
Motorsteuergeräts  
erweitern können. Die  
Daten dieses Geräts liest  
Weidenbach in seinem  
Auto per Laptop aus.

und sinnvoll ist, und sie kann, mehr noch, bei Bedarf sogar erklären, was sie macht. Bekanntlich sind Computer zunächst einmal dumm. Sie rechnen stumpf vor sich hin, indem die Transistoren in ihrem Innern an- und ausgeschaltet werden. Damit können sie zum Beispiel addieren oder subtrahieren. Logische Schlüsse sind anspruchsvoller. Das zeigt schon eine einfache logische Kette wie „Alle Menschen sind sterblich“ – „Sokrates ist ein Mensch“ – „Also ist auch Sokrates sterblich“. Derartige logische Wenn-dann-Beziehungen, also Regeln, sind eine Grundlage für jede Software und alles, was ein Rechner berechnen kann.

Das gilt etwa für den Airbag. Beim Airbag ist die Steuerung permanent damit beschäftigt zu überprüfen, ob sie auslösen muss oder nicht. Sie analysiert Parameter wie die Beschleunigung und muss

extrem schnell entscheiden, ob es tatsächlich einen Unfall gegeben hat. Würde sie im falschen Moment auslösen, könnte sie einen Verkehrsunfall verursachen, wenn der Airbag dem Fahrer unvermittelt ins Gesicht schlägt. Bei der Entwicklung von Airbag-Software wird daher logisch-mathematisch getestet, ob die Software später im Auto stets korrekt arbeiten wird. Mit Weidenbachs Ansatz kann die Korrektheit bewiesen werden. Die Herausforderung für Logikprogramme besteht einfach darin, ungeheuer große Datenmengen in Sekundenbruchteilen verarbeiten zu müssen. Noch stoßen sie an ihre Grenzen. Der Max-Planck-Forscher ist da schon weiter. Für seinen Speedster setzt er logische Verfahren ein, die noch jung und nicht in der Industrie angekommen sind.

Christoph Weidenbach hat nach seiner Habilitation Anfang der 2000er-Jahre einige Zeit für den Autohersteller GM gearbeitet. Mit Logik hatte er damals wenig zu tun. Als Manager hatte er unter anderem die Aufgabe, das Ressourcenplanungssystem SAP in Europa mit einzuführen. „Allerdings hatte ich damals vertraglich vereinbart, vierzehn Tage im Jahr am Max-Planck-Institut weiterarbeiten zu dürfen. So etwas gibt es sonst eigentlich nicht“, sagt er. So blieb er über die Jahre mit der Forschung in Berührung. Im Jahr 2005 kehrte Weidenbach schließlich ans Institut zurück, weil er das klare rationale Arbeiten vermisst hatte. Von daher kennt er beide Seiten sehr gut – die Informatik mit ihrer Logik und den Bedarf der Industrie.

Eine weitere Anwendung der von Weidenbach entwickelten Verfahren ist das Management von Produktbaukästen der Automobilhersteller. Dabei handelt es sich um komplexe Listen, die sämtliche Teile enthalten, die in den verschiedenen Automodellen verbaut sind – von der Schraube bis zur Windschutzscheibe. Ideal ist es für einen Hersteller, wenn er für neue Fahrzeugtypen Teile wiederverwenden kann. Nur lässt sich das nicht immer ohne Weiteres feststellen. Schwierig ist etwa die Frage, ob es gelingt, ein neues Auto zu bauen, das bestimmte Eigenschaften erfüllt – beispielsweise ein neues Modell, das eine Höchstgeschwindigkeit

→

von 200 Kilometern pro Stunde erreicht und nur vier Liter Kraftstoff auf 100 Kilometer benötigt. Dem Computer reicht es nicht, mit einem Plan gefüttert zu werden wie: „Für das neue Modell X wird Motor Z verwendet.“ Er braucht Regeln wie: „Motor Z passt in jedes Auto, dessen Motorraum ein Volumen von 1,10 Meter Breite und 0,6 Meter Tiefe hat.“

Führende Autohersteller nutzen solche Modellierungen bereits. Noch aber hakt es, weil es ungeheuer viele Varianten gibt. Ein konkretes Auto könnte ein Coupé oder ein Cabriolet sein, es könnte mit zehn verschiedenen Motoren, fünf verschiedenen Getrieben und mit diversen Rädern ausgestattet werden. Manche Fahrzeuge haben eine Anhängerkupplung, andere eine große HiFi-Anlage. Insgesamt ergeben sich Milliarden verschiedener Kombinationen. Eine einfache Aufzählung aller Varianten

träger kombinierbar“ nicht in wenigen logischen Schritten mit dem Ausgangsproblem „nur vier Liter auf 100 Kilometer“ in Verbindung gebracht werden kann, wird sie gelöscht. „Doch auch mit solchen Verfahren lässt sich nur etwa ein Drittel der Einsichten eliminieren“, sagt Weidenbach. Sein Ziel ist es daher, die Mathematik und die Logik so zu kombinieren, dass Regelwerke entstehen, die sich in der Praxis anwenden lassen und in akzeptabler Zeit zu einer Lösung führen – für die Modellierung eines neuen Autos, die den gesamten Baukasten und die technischen Zusammenhänge berücksichtigt, aber auch für ganz andere Fragestellungen.

Christoph Weidenbach und sein Team haben ein Software-Gerüst entwickelt, das Framework „Superlog“, das aufgrund sogenannter Modellannahmen rechnet. Es setzt bestimmte Tatsachen, die es aus

## „Großartig ist, dass Geräte dank der logischen Vorgehensweise auch erklären können, warum sie etwas tun.“

ten funktioniert daher oftmals nicht. Heutige logische Verfahren lösen das Problem, indem sie aus den bekannten Regeln neue Einsichten erlernen. Eine Einsicht könnte sein, dass kein Motor die Verbrauchsvorgabe „nur vier Liter auf 100 Kilometer“ in Kombination mit der großen HiFi-Anlage erfüllt. Das ist bereits eine sinnvolle Information.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass auch die Zahl der Einsichten aufgrund der vielen Kombinationsmöglichkeiten noch zu groß ist. So könnte das System etliche nutzlose Aussagen ausspucken wie: „Die Anhängerkupplung ist nicht mit einem Fahrradträger kombinierbar“, was weniger mit dem Ausgangsproblem zu tun hat. Computerprogramme, die heute nach diesem Prinzip des Lernens durch Generierung neuer Einsichten arbeiten, kranken also an der schieren Zahl möglicher Einsichten.

„Man versucht heute, dieses Problem zu lösen, indem man unnötige Einsichten eliminiert“, erklärt Christoph Weidenbach. Wenn etwa die Einsicht „Die Anhängerkupplung ist nicht mit einem Fahrrad-

den Regeln ableitet, als bekannt voraus und rechnet nur dort, wo das logische Modell noch nicht passt. Das ist in etwa so, als würde man von vornherein voraussetzen, dass Sokrates ein Mensch ist. Damit verkürzt sich der rechnerische Aufwand enorm. Datenmassen lassen sich damit effizient in die Regelwerke überführen. Eine Anwendung gibt es bereits: die Software für das Steuergerät in Weidenbachs Speedster, die in Millisekunden eine Reihe von Motorparametern aufnimmt und in Echtzeit modelliert, welche Steuerbefehle gegeben werden sollen. Die Geschwindigkeit dieser logischen Analyse ist konkurrenzlos schnell. „Großartig ist, dass Geräte dank der logischen Vorgehensweise auch erklären können, warum sie etwas tun“, sagt der Wissenschaftler – anders als herkömmliche Steuergeräte, die einfach aufgrund bestimmter Parameter einen Befehl geben.

Solche Geräte könnten die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine deutlich erleichtern und sicherer machen. Christoph Weidenbach erinnert an den Absturz der Air-France-Maschine auf dem

—>

FOTO: ANNA ZIEGLER



51

Innovativer Ansatz: Informatik, wie sie Christoph Weidenbach betreibt, beschränkt sich längst nicht auf theoretische Studien. Der Autofan setzt die Ergebnisse seiner Forschungen auch in die Tat um und testet sie im eigenen, 300 PS starken Roadster, den er hin und wieder am Nürburgring ausfährt.

Flug von Brasilien nach Paris am 1. Juni 2009. Weil die Staudrucksensoren für die Geschwindigkeitsmessung der Maschine vereist waren und widersprüchliche Informationen lieferten, schaltete sich mitten über dem Atlantik der Autopilot ab. Die Piloten waren durch das Verhalten der Flugzeugsteuerung verwirrt – das geht aus den Stimmenaufnahmen des Flugschreibers hervor. Der fliegende Pilot zog die Nase der Maschine in der Folge viel zu steil hoch, ohne dass die beiden anderen Männer im Cockpit dies bemerkten. Schließlich riss die Strömung an den Tragflächen ab, weil das Flugzeug zu langsam wurde. Es stürzte ins Meer. Wäre das Steuergerät in Logik modelliert worden, hätte es einfach erklären können, dass der Steuerknüppel des Piloten, der die Nase nach oben zog, Priorität hatte über

anstaltungen auf den Dörfern und in Vereinen, um Geld zu verdienen – und sich ein Motorrad zu kaufen. „Irgendwann wurde mir allerdings klar, dass man davon auf die Dauer nicht leben kann – und vom Jazz schon gar nicht.“ Daher entschied er sich für die Computerwissenschaften und wurde von der damaligen Zentralstelle für die Vergabe von Studienplätzen an die Universität Kaiserslautern geschickt. Was genau ihn schließlich in diese Fachrichtung gebracht hat, das kann er nicht sagen. Vielleicht war es das Einmaleins, das sein Vater ihm eingebimst hatte. Eine große Rolle spielte sein Cousin, der in Bonn Mathematik studiert und ihn als Jugendlichen für logische Beweisverfahren begeistert hatte. Irgendwie sei seine Karriere auch zufällig verlaufen.

## „Ich hielt den Ansatz für falsch und Harald Ganzinger mein Promotionsthema für Quatsch. Das hat er mir knallhart gesagt.“

52

den Steuerknüppel des Piloten, der sie nach unten drücken wollte, um Geschwindigkeit zu gewinnen.

Dass Christoph Weidenbach bei der Modellierung nicht-trivialer technischer Sachverhalte gelandet ist, ist im Grunde ein Zufall. Er arbeitete gerade an seiner Promotion, als sein Betreuer 1991 nach Saarbrücken zu Harald Ganzinger wechselte, damals Direktor am Institut. Ganzinger leitete die Arbeitsgruppe „Logik der Programmierung“. Er befasste sich mit der Idee, das Rechnen in Logik durch sogenannte Ordnungen einzugrenzen und zu vereinfachen. „Ich hielt den Ansatz für falsch und Harald Ganzinger mein Promotionsthema für Quatsch. Das hat er mir knallhart gesagt“, erzählt Christoph Weidenbach. „Am Ende haben wir uns dann aber unsere Theorien gegenseitig genauer angeschaut – und zusammen einige wirklich gute Fachartikel publiziert.“

Als Jugendlicher spielte Weidenbach auf hohem Niveau Saxofon. Mit fünfzehn landete er sogar in der Landesjugendbigband von Rheinland-Pfalz – einer Art Kadenschmiede. „Ich überlegte damals, den Jazz zum Beruf zu machen.“ Mit befreundeten Musikern tingelte er an den Wochenenden zu Tanzver-

Heute hilft Christoph Weidenbach jungen Menschen dabei, sich beruflich zu orientieren und leichter ans Ziel zu gelangen. Er leitet den Beirat des Bundeswettbewerbs Informatik, der junge Talente fördert. Jedes Jahr werden aus mehr als tausend Oberstufenschülerinnen und -schülern nach zwei Wettbewerbsrunden dreißig Kandidaten ausgewählt. Es gibt Einzelgespräche und Gruppenaufgaben. Die Besten erhalten ein Stipendium der Studienstiftung. Für Weidenbach ist es ganz besonders wichtig, die Jugendlichen zu beraten: „Wir kennen die guten Informatikstandorte und die spannenden Inhalte und sehen zu, dass die Jugendlichen in gute Hände kommen – und manchmal hilft es auch, wenn wir ihnen Empfehlungsschreiben mitgeben können.“

Christoph Weidenbach will vermeiden, dass sie ihr Talent vergeuden. „An einer Riesen-Uni geht man unter. Ein duales Studium wird den richtig guten Schülern nicht gerecht. Wir sehen zu, dass unsere Kandidaten in Sachen Studium keinen Unfug machen.“ Der Wissenschaftler sagt, dass er Glück gehabt habe, bei Harald Ganzinger gelandet zu sein. Was seine fachliche Entwicklung angeht, habe ihm das Tore geöffnet. „Jetzt versuche ich, junge Leute in die richtigen Bahnen zu lenken.“





# ACH, MENSCH

1 2

Vergangenheit  
Zukunft

WIE LEBTEN DIE ERSTEN  
MENSCHEN IN EUROPA?

WIE COOL DURFTE MAN IN  
FRÜHEREN ZEITEN AUFTRETEN?

SEIT WANN GIBT ES  
BETRIEBSRÄTE?

WIE HAT ERDÖL DIE  
WELT VERÄNDERT?

WIE PRÄGT DER KOLONIALISMUS  
NOCH HEUTE DAS RECHT?

Geistes- und  
Sozialwissen-  
schaftler:innen  
im Gespräch

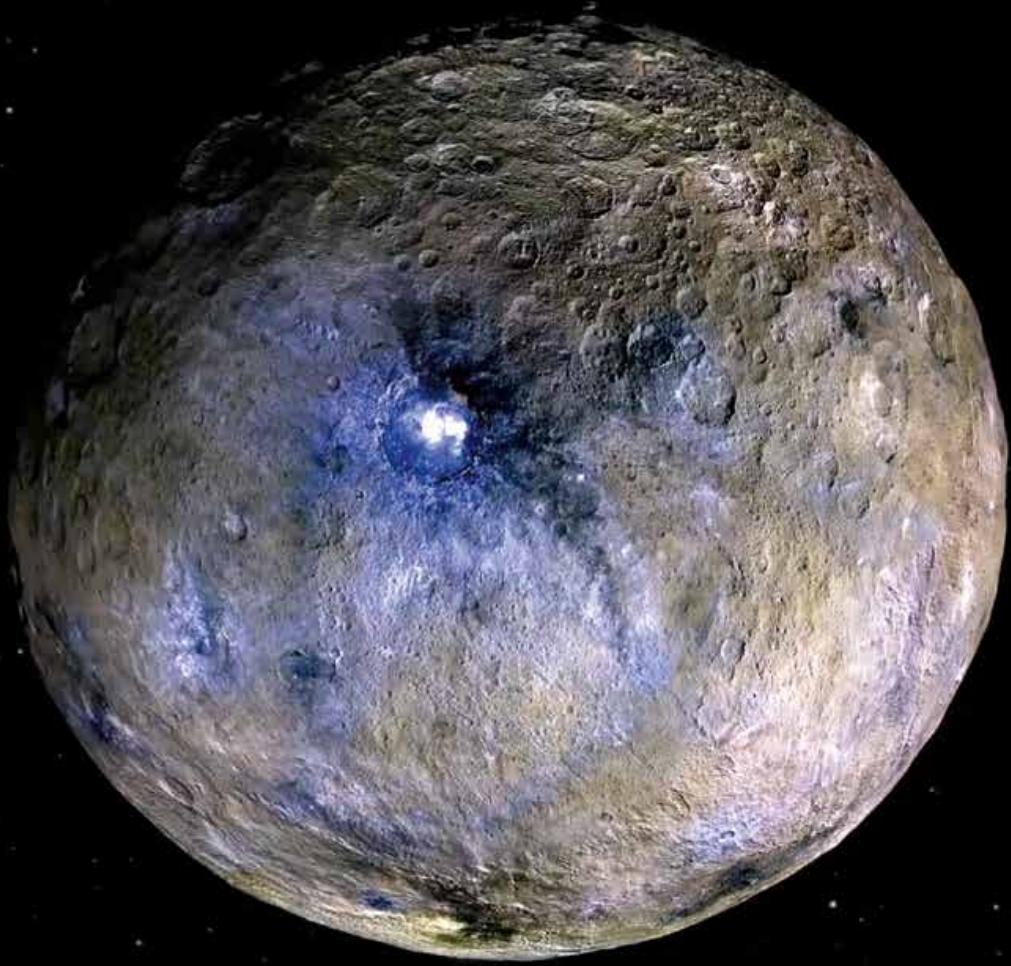
Eine Podcastserie von detektor.fm  
und der Max-Planck-Gesellschaft

Ab April 2022 mit neuen Folgen!



[www.mpg.de/16838013](http://www.mpg.de/16838013)





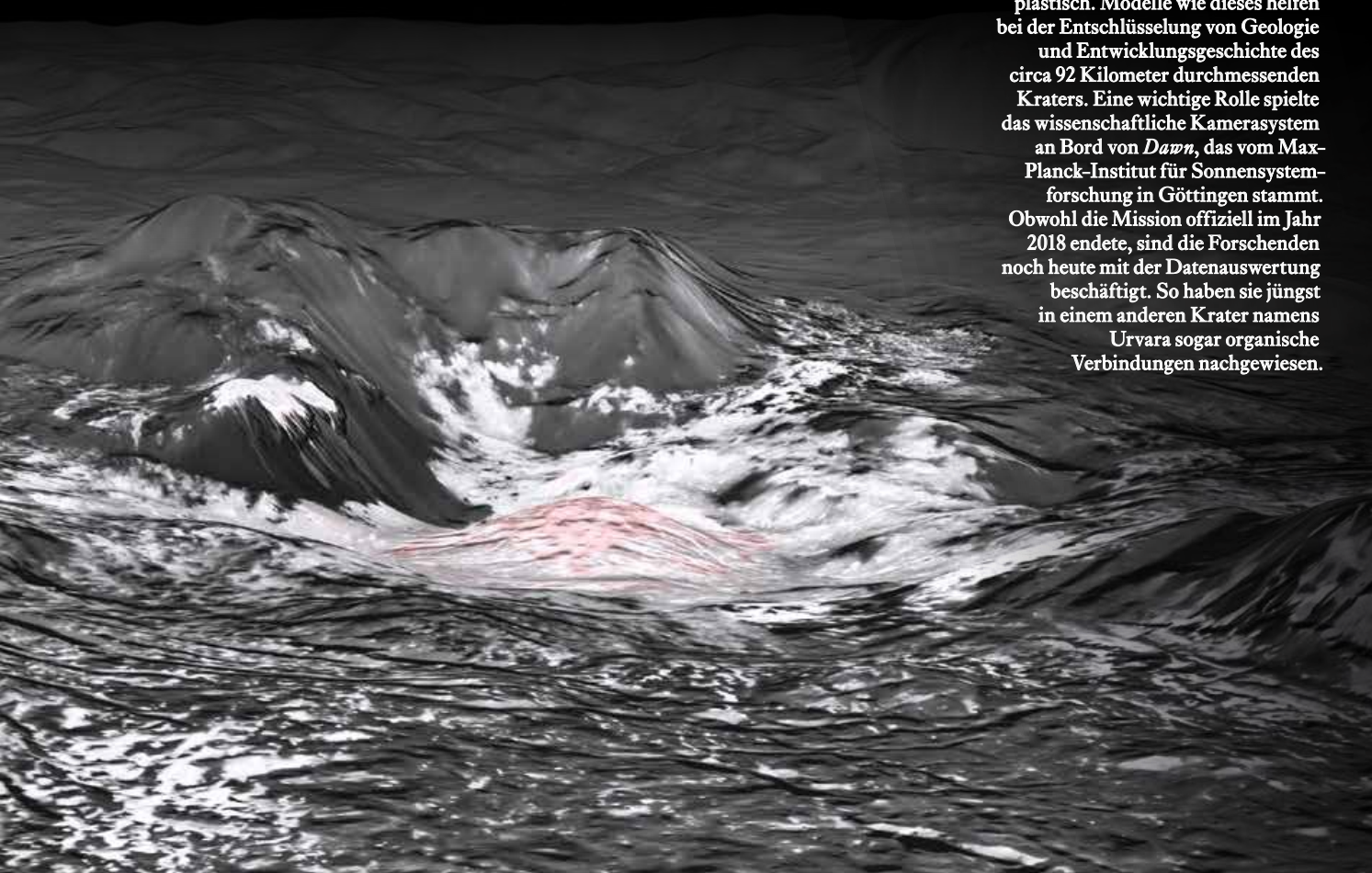
# ZWEITER BLICK

MAX-PLANCK-INSTITUT  
FÜR SONNENSYSTEMFORSCHUNG

Die bizarre Landschaft auf dem Foto ist nicht von dieser Welt. Vielmehr zeigt die Aufnahme den zentralen Bereich des Occator-Kraters auf Ceres.

Der rund 950 Kilometer große Zwergplanet – links in einer Gesamtansicht – war und ist möglicherweise noch immer ein Schauplatz von aktivem Eisvulkanismus: Salzhaltige Lösung stieg aus dem Innern auf, das Wasser verdunstete und hinterließ helle Ablagerungen. In Occator enthielten die Aufnahmen der unbemannten Nasa-Raumsonde *Dawn* zudem eine 340 Meter hohe, ebenfalls von Salzablagerungen überzogene Kuppe. In der 3D-Rekonstruktion erscheint die „verschneite“ Region besonders plastisch. Modelle wie dieses helfen bei der Entschlüsselung von Geologie und Entwicklungsgeschichte des circa 92 Kilometer durchmessenden Kraters. Eine wichtige Rolle spielte das wissenschaftliche Kamerasystem an Bord von *Dawn*, das vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen stammt. Obwohl die Mission offiziell im Jahr 2018 endete, sind die Forschenden noch heute mit der Datenauswertung beschäftigt. So haben sie jüngst in einem anderen Krater namens Urvara sogar organische Verbindungen nachgewiesen.

55



# IM DARM TOBT DAS LEBEN

TEXT: TIM SCHRÖDER

56

Bakterien sind fast überall. Sie begegnen uns als Krankheitserreger oder Verursacher von Infektionen, meist aber als unverzichtbare Helfer. Ohne Darmbakterien könnten wir zum Beispiel unsere Nahrung nicht so effektiv verdauen. Eine vielfältige Mikrobengemeinschaft – das sogenannte Mikrobiom – begleitet den Menschen seit Hunderttausenden von Jahren. Ruth Ley und ihr Team am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen erforschen, wie die Mikroben die Evolution des Menschen beeinflusst haben.

Unser Körper ist ein Biotop – nicht für Pflanzen oder Tiere, sondern für Bakterien: Milliarden von Mikroben siedeln auf und in unserem Körper. Klingt etwas befremdlich, ist aber überlebenswichtig: Unsere Untermieter wehren Feinde ab, helfen uns bei der Verdauung und versorgen uns mit lebenswichtigen Spurenelementen. Manche Bakterienarten begleiten den Homo sapiens, seit er vor mehreren Zehntausend Jahren von Afrika aus

fast alle Kontinente besiedelte. Nicht der Hund ist also des Menschen treuester Begleiter, es sind die Bakterien!

Eine Mikrobe, die den Menschen von Anfang an begleitet hat, ist das Bakterium *Helicobacter pylori*, der Verursacher von Magenkrebs. *Helicobacter* ist aber nicht der einzige Mitreisende in der menschlichen Geschichte. „Unseren Erkenntnissen zufolge besitzen eine ganze Reihe anderer Darmbakterien ebenfalls afrikanische Wurzeln“, sagt Ruth Ley, Direktorin am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie. Viele davon sind durchaus nützlich für den Menschen: das Darmbakterium *Prevotella copri* zum Beispiel, das vor Allergien schützt, oder *Eubacterium hallii*, das Zucker und Säuren verdauen hilft.

So, wie sich der Mensch auf seinem Weg über den Erdball laufend an neue Umwelten – an neue Klimabedingungen, neue Krankheitserreger oder an

Ackerbau und Viehzucht – angepasst und sein Erbgut entsprechend verändert hat, haben auch die Mikroben genetische Veränderungen durchlaufen. Das Faszinierende: Wenn im Genom des Menschen Mutationen stattfanden, kam es oft auch im Erbgut der Bakterien zu Veränderungen. Ruth Ley und ihr Team am Tübinger Max-Planck-Institut suchen nach Hinweisen darauf, dass die Evolution der Darmbakterien parallel zu der von uns Menschen verläuft. „Wir haben also ein faszinierendes Wechselspiel zwischen den Bakterien und den Menschen vor uns“, sagt die Forscherin.

Die Migrationsgeschichte des Menschen können Forschende heute an seinem Erbgut ablesen und rekonstruieren. Genetiker haben eine Karte genetischer Anpassungen des Menschen an neue Umweltbedingungen erstellt. „Wir nutzen diese Karte, um nach Veränderungen im Erbgut der Mikroorganismen zu suchen“, sagt Ruth Ley.





# WISSEN AUS

— BIOLOGIE & MEDIZIN

57

Zur Darmflora zählen unter anderem auch sogenannte Archaeen – einzellige Mikroorganismen ohne Zellkern. *Methanobrevibacter smithii* beispielsweise ist einer der am weitesten verbreiteten Mikroorganismen im Verdauungstrakt.

Ein Paradebeispiel für das Zusammenspiel zwischen Mensch und Mikrobe ist die Verdauung von Laktose, also von Milchzucker. Dieser wird im Dünndarm durch das Enzym Laktase abgebaut und liefert dem Neugeborenen während der Stillzeit Energie. Fast die ganze Menschheitsgeschichte hindurch nahm der Milchanteil in der Nahrung bis zum Ende der Stillzeit ab und damit auch die Laktaseproduktion. Dies änderte sich mit der Domestizierung von Wildrindern, -ziegen und -schafen vor 2500 bis 10 000 Jahren. „Die Menschen konnten nun die Milch dieser Tiere zeitlebens als Energiequelle nutzen“, erklärt Ruth Ley. „Menschen in Nord-europa zum Beispiel, die bis ins Erwachsenenalter Laktase produzierten, hatten damit einen enormen evolutionären Vorteil.“ Tatsächlich haben sich in Regionen mit hohem Milchkonsum wie in Europa Genvarianten durchgesetzt, welche die Laktaseproduktion ein ganzes Leben lang in Schwung halten.

58

## Verdauung von Milchzucker

Der Milchzuckerabbau durch Laktase ist das eine. Hinzu kommt die Verdauungsarbeit durch Bifidobakterien, eine weitere Gruppe treuer Begleiter der Säugetiere. Während die Laktase den Milchzucker im Dünndarm abbaut, verwerten Bifidobakterien und andere Mikroorganismen ihn im weiter hinten gelegenen Dickdarm. Sie nehmen die Laktose entweder als Ganzes auf oder spalten sie mit dem Enzym Beta-Galaktosidase auf, danach nutzen sie die Bruchstücke Glucose und Galaktose. Allerdings liefert der bakterielle Abbau weniger Energie als die Verarbeitung des Milchzuckers durch die Laktase und die Aufnahme von Glucose und Galaktose durch den Körper. Es lohnt sich folglich für Menschen, die Milch zu sich nehmen, die körpereigene Laktaseproduktion für den Milchzuckerabbau über das Säuglingsalter hinaus beizubehalten.

Menschen, die Laktase zeitlebens und nicht nur als Säuglinge produzieren, konkurrieren im Grunde genommen mit den Bifidobakterien um den Milchzucker. Alle anderen können sich glücklich schätzen, dass es Bifidobakterien gibt, welche für sie die Laktose verdauen. Denn ohne die Mikroben würde der wertvolle Zucker den Darm ungenutzt passieren und verloren gehen. Daher besitzen Erwachsene, die nur wenig oder gar keine Laktase bilden, auch höhere Konzentrationen von Bifidobakterien als diejenigen, die zeitlebens Laktase produzieren.

Wenn Menschen ohne dauerhafte Laktaseproduktion nach der Aufnahme von Laktose aus Milchprodukten Bauchschmerzen oder Durchfall bekommen, spricht man von einer Laktoseintoleranz. Ursache sind osmotische Ungleichgewichte und/oder bei der Laktoseverwertung entstehende Gase. Aber das ist nicht immer der Fall: Ruth Leys Analysen zeigen, dass in Vietnam und Gabun bei 20 Prozent der Menschen ohne dauerhafte Laktaseproduktion bei der Verdauung keine Gase entstehen. Häufig besitzen diese Menschen mehr Bifidobakterien oder andere Mikroben, die die Laktose verwerten, ohne dabei große Gas-mengen zu produzieren. Dies könnte ein Ansatz für die Behandlung einer Laktoseintoleranz sein. Eine Möglichkeit wäre, die Bakterien in Form von Probiota zu erhöhen. „Man muss allerdings die Wirksamkeit solcher Behandlungen testen und herausfinden, welche Stämme in welcher Konzentration wirken“, erklärt Ley.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse legen den Schluss nahe, dass Bifidobakterien als Verwerter von Laktose unverzichtbar waren, als der Mensch Rinder, Schafe und Ziegen zu halten begann. Damals half die Mikrobe, Energie aus der Milch zu gewinnen. Mit der Zeit entstanden dann im Erbgut des Menschen Genvarianten, die zeitlebens eine Laktaseproduktion ermöglichten und die Arbeit der Mikroben überflüssig machten. „Anders als beispielsweise bei der Koevolution

von Zellen und ihren Organellen handelt es sich dabei nicht um eine klassische Koevolution zweier Organismen, die verschmelzen und voneinander vollständig abhängig werden“, betont Ruth Ley. Beispiel einer besonders engen Form der Koevolution sind die Mitochondrien – Organellen, die Zellen mit Energie versorgen. Die Forschung geht heute davon aus, dass vor Jahrmillionen eine Zelle eine andere – möglicherweise ein sogenanntes Archaeon – geschluckt und dauerhaft in sich aufgenommen hat. Zwischen den Zellen höherer Organismen und den Mitochondrien findet seitdem ein reger Austausch an Genen statt.

## Gemeinsame Evolution?

„Die Genome von Mensch und Bakterien dagegen beeinflussen einander zwar gegenseitig, wir können aber nicht ausschließen, dass sie sich getrennt voneinander weiterentwickeln. Bislang gibt es keinen Hinweis darauf, dass der Mensch und seine Mikroben im Darm im klassischen Sinne koevolvieren“, erklärt Ley. Um die Na-

---

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Der Körper des Menschen wird von unzähligen Mikroorganismen besiedelt. Ohne dieses sogenannte Mikrobiom könnten wir nicht überleben. Im Darm beispielsweise sind Bakterien unverzichtbar für die Verdauung.

Die Evolution des Menschen ist eng mit der Entwicklung seiner Darmbakterien verknüpft. Aus Ähnlichkeiten in den genetischen Stammbäumen können Forschende die Wanderungsbewegungen des Menschen rekonstruieren.

---



FOTO: JEAN-CLAUDE WINKLER PHOTOGRAPHY

Am Max-Planck-Institut für Biologie Tübingen erforscht Ruth Ley mit ihrem Team, wie sich der Mensch und die Mikroorganismen in seinem Darm in ihrer Evolution gegenseitig beeinflussen.

seinem Team haben die Forschenden Proben von mehr als 700 Erwachsenen und 300 Kindern in Vietnam, Gabun und Deutschland gesammelt. Weitere Daten stammten aus Großbritannien, Kamerun und Südkorea sowie aus öffentlich zugänglichen Quellen. Der Vergleich von Eltern und Kindern ist wichtig, weil Darmbakterien über viele Generationen weitergegeben werden.

Ruth Ley und ihr Team haben festgestellt, dass es Bakterien gibt, die Familien und anderen Gemeinschaften besonders treu sind. Andere wiederum besiedelten schnell neue Bevölkerungsgruppen. Klar ist inzwischen, dass die Darmflora sich mit der Zeit an die typische Ernährung in einer Region anpasst. „Das hat dazu geführt, dass verschiedene Populationen von Menschen über Bakterienarten verfügen, die exakt auf sie zugeschnitten sind – sowohl auf ihr Erbgut als auch auf ihre Ernährung“, so Ley.

59

Der Beziehung zu entschlüsseln, vergleicht die Wissenschaftlerin die Veränderungen im Erbgut von Mensch und Mikroben. So erhält sie Informationen über die evolutionären Beziehungen von Menschen mit ihren Symbiosepartnern im Darm. Mikroben, die sich gemeinsam mit dem Menschen entwickelt haben, weisen ganz ähnliche Verzweigungsmuster in ihren Stammbäumen auf. „Die Sequenzierung der DNA und das Entschlüsseln der Erbinformation sind dabei nur ein Teil der Arbeit. Die eigentliche Herausforderung besteht vielmehr darin, die Daten zusammenzutragen“, sagt Ley.

Dafür benötigen die Forschenden menschliche DNA und Stuhlproben. Aus diesen Proben können sie das Erbgut der Darmflora gewinnen. „Viele der bisherigen Forschungsarbeiten wurden ausschließlich in Westeuropa durchgeführt. Mit einem Genomvergleich leisten wir hier Pionierarbeit.“ Drei Jahre hat es gedauert, bis Ruth Ley und ihre Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter schließlich die Genomdaten von nahezu tausend Menschen und ihrer jeweiligen Darmflora erfasst hatten. Gemeinsam mit Peter Gottfried Kreamer, Professor für Tropenmedizin am Universitätsklinikum Tübingen, und

## Verwertung von Stärke

Die Forscherin ist davon überzeugt, dass Bakterien eine weitaus größere Rolle bei der Evolution des Menschen gespielt haben als bislang angenommen – und das nicht nur als Krankheitserreger. So hat Ruth Leys Forschung ergeben, dass wir überhaupt nur mit bakterieller Hilfe Stärke effektiv verwerten können. Die Samen von Gräsern mit hoher landwirtschaftlicher Bedeutung wie Getreide, Reis oder Mais enthalten große Mengen dieses Speicherstoffes – je nach Pflanze unterschiedlich gut verdauliche Formen. Durch die Kultivierung dieser Pflanz-



zen stand den Menschen plötzlich ein erstklassiger Energielieferant zur Verfügung – allerdings nur, wenn sie die Stärke auch verdauen konnten. Dafür braucht es ausreichende Mengen des Enzyms Amylase. Die Verdauung leichter verdaulicher Stärke beginnt bereits im Mund durch das im Speichel enthaltene Enzym. Schwerer verdauliche Stärke dagegen wird im Verdauungstrakt von Bakterien zersetzt und fermentiert.

Wie sich Wirt und Mikrobe den Stärkeabbau aufteilen, hängt sehr vom Erbgut eines Menschen ab. Liegt das Gen für die Produktion der Speichelamylase im Erbgut mehrfach vor, kann mehr Stärke im Mund abgebaut werden. Heute weiß man, dass von Jägern und Sammlern abstammende Menschen im Schnitt weniger Kopien des Amylase-Gens besitzen als Menschen aus bäuerlichen Gesellschaften. Stärkehaltige Lebensmittel machten ursprünglich wahrscheinlich einen kleineren Anteil der täglichen Nahrung aus. Mit dem Anbau von Getreide, Reis und Mais wurde es

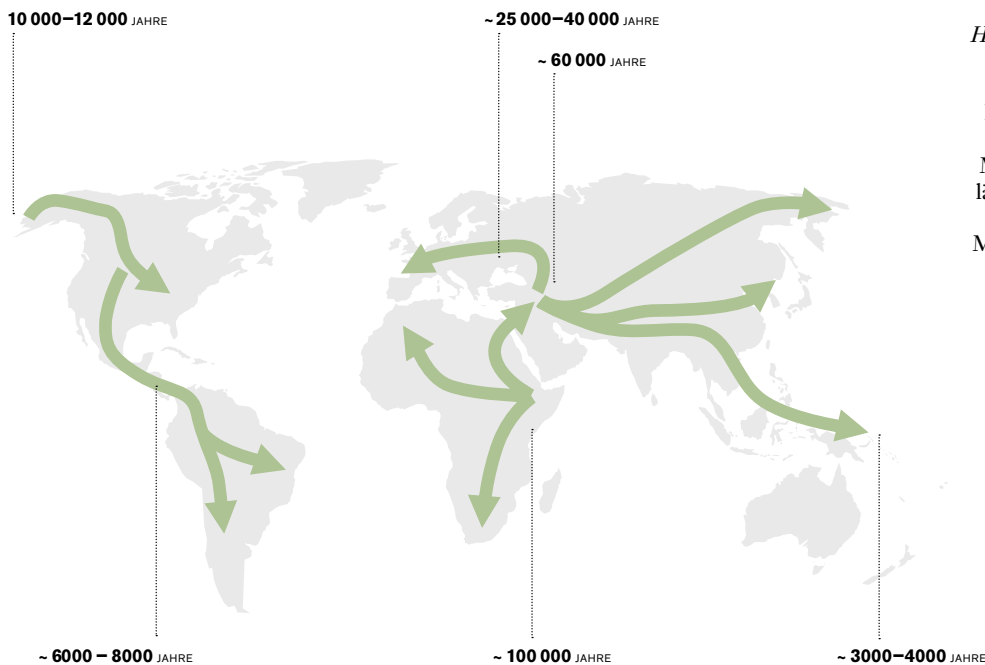
wichtiger, Stärke besser verdauen zu können. Eine zweite Kopie des Amylase-Gens könnte den Menschen einen Fitnessvorteil verschafft haben, denn die Verdauung mittels Amylase im Mund erhöhte die Energieausbeute im Vergleich zur mikrobiellen Fermentation.

Manche Menschen produzieren viel Speichelamylase, andere nur wenig. Ley und ihr Team haben gezeigt, dass sich die Darmflora beider Typen deutlich unterscheidet: Menschen mit mehreren Kopien des Amylase-Gens produzieren mehr Amylase im Mund und weisen zugleich im Darm eine deutlich höhere Anzahl an Bakterien der Gattung *Ruminococcus* auf – eines Bakteriums, das auf die Fermentation jener Stärke spezialisiert ist, die vom Menschen allein schwer zu verdauen ist. Wenn die einfache Stärke fast vollständig im Mund aufgespalten wird, bleibt für die Mikroben im Darm nur die verdauungsresistente Form übrig. Und um diese optimal zu nutzen, sind möglichst viele *Ruminococcus*-Zellen von Vorteil.

Ruth Ley und ihr Team gehen davon aus, dass *Ruminococcus* Menschen mit vielen Kopien des Amylase-Gens einen evolutionären Vorteil verschafft hat, da diese auch schwer verdaubare Stärke besser verwerten. „Bakterien können also die Evolution des Menschen beeinflussen“, sagt Ley.

Eine parallele Evolution von Bakterien und ihren Wirten ist auch bei anderen Säugetieren wahrscheinlich. Viele geben Bakterien durch Körperkontakt oder spezielle Verhaltensweisen an die nächste Generation weiter. Bei Reptilien und Vögeln dagegen scheinen sich Bakterien und Wirte getrennt zu entwickeln. Ob Bakterien auch von einer Art auf die andere wechseln, ist noch offen. Von Bifidobakterien etwa gibt es eine Vielzahl an Stämmen, einige leben im Darm von Schweinen. „Die Frage ist, ob Stämme von einer Familie an die nächste weitergegeben wurden und wie treu das Bakterium dem Menschen überhaupt ist – vielleicht sind ja manche Stämme von einer Säugetierart auf andere gewechselt“, so Ruth Ley.

←



Als der Mensch aus seiner ursprünglichen Heimat Ostafrika aufbrach, nahm er in seinem Darm Mikroorganismen wie das Bakterium *Helicobacter pylori* mit. Änderungen im menschlichen Erbgut ermöglichten Anpassungen an neue Lebensbedingungen. Parallel dazu änderten sich auch die Gene der Mikroorganismen im Darm. Daher lässt sich an dem Genom der Mikroben ablesen, welche Wege der Mensch bei seiner Ausbreitung über die Erde eingeschlagen hat. Die Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf die globalen Wanderbewegungen in der Zeit vor heute.

„Dem Anwenden muss das Erkennen vorausgehen.“ Max Planck

# Eine Idee, 86 Institute

Die Max-Planck-Gesellschaft  
betreibt Grundlagenforschung in  
den Natur-, Lebens- und Geistes-  
wissenschaften an 86 Instituten.

## GEISTES-, SOZIAL- UND HUMANWISSENSCHAFTEN

Humanwissenschaften / Kulturwissenschaften / Rechtswissenschaften / Sozialwissenschaften /  
Verhaltenswissenschaften / Wirtschaftswissenschaften / ...

## BIOLOGIE UND MEDIZIN

Entwicklungsbiologie / Evolutionsbiologie / Immunbiologie / Infektionsbiologie / Medizin / Mikrobiologie /  
Neurobiologie / Ökologie / Pflanzenforschung / Psychiatrie / Strukturbiologie / Verhaltensbiologie / Zellbiologie / ...

## CHEMIE, PHYSIK, TECHNIK

Astronomie / Astrophysik / Chemie / Festkörperforschung / Informatik / Klimaforschung / Komplexe Systeme /  
Materialwissenschaften / Mathematik / Nanowissenschaften / Plasmaphysik / Quantenphysik / Teilchenphysik / ...

[www.mpg.de/institute](http://www.mpg.de/institute)

**MAX PLANCK**  
GESELLSCHAFT



Unter der Haube:  
Mithilfe von EEG-  
Messungen lassen sich  
Veränderungen der  
Gehirnaktivitäten  
beim Klavierspielen  
beobachten – etwa  
bei musikalischen  
Herausforderungen.

# MUSIK IM KOPF

TEXT: STEFANIE REINBERGER

Musik, ist eine urmenschliche Fähigkeit, genetisch in unseren Köpfen verankert und, genau wie die Sprache, eine universelle Eigenschaft des Menschen. Das menschliche Gehirn ist dafür geschaffen, Musik sowohl zu genießen als auch zu produzieren. Was genau im Kopf beim Musizieren geschieht, das untersucht Daniela Sammler mit ihrem Team am Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik.

Menschen machen schon seit Jahrtausenden Musik. So kennt man Knochenflöten, die bei archäologischen Untersuchungen in Höhlen auf der Schwäbischen Alb zutage kamen – rund 35 000 Jahre alt, geschnitzt und gespielt von Steinzeitmenschen. Sie gelten als die ältesten Fundstücke von Musikinstrumenten, aber man kann davon ausgehen, dass Musik in der menschlichen Evolution bereits viel früher eine Rolle gespielt hat. Dabei ist Musik sehr wahrscheinlich kein evolutionäres Nebenprodukt, das sich aus der Sprache heraus entwickelt hat, wie die Wissenschaft lange annahm. Stattdessen scheint sie eher eine Art

Schwester der Sprache zu sein – zwei Kommunikationsarten, entstanden aus einem gemeinsamen frühen Vorläufer. Das macht sich auch im Gehirn bemerkbar: Es nutzt beim Verarbeiten von Sprache und Musik teils dieselben Regionen.

Solche Gemeinsamkeiten von Sprache und Musik sind ein zentrales Thema von Daniela Sammler und ihrer Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik. Dabei interessieren sie sich unter anderem dafür, in welchen Bereichen beide Ausdrucksformen ähnlichen Mechanismen unterliegen – und wann das Gehirn unterschiedliche Lösungen braucht, um Sprache oder Musik zu verarbeiten. Schon vor ihrer Zeit in Frankfurt widmete sich Sammler am Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig gemeinsam mit Stefan Koelsch und

Angela Friederici Studien zum Hören von Musik. Eine der zentralen Fragen war, wie wir Harmonien, aber auch Disharmonien wahrnehmen. Musik folgt bestimmten Regeln, ähnlich wie einer Art Grammatik – und das kommt beim Musikhören zum Tragen: Menschen haben die musikalischen Regeln ihres kulturellen Umfelds verinnerlicht und wenden sie beim Musikhören intuitiv an. So gibt es Harmoniefolgen, die unserem Gehirn stimmig erscheinen – und andere, die dem Regelwerk widersprechen. Tatsächlich gelang es den Forschenden, in ihren Experimenten nachzuvollziehen, dass das Gehirn auf „Regelverstöße“, etwa auf unpassende Schlussakkorde, mit veränderter Aktivität reagiert. „Interessanterweise ist die Hirnantwort bei Disharmonien vergleichbar mit der, die wir bei grammatikalischen Fehlern in der Sprache beobachten“, so Sammler.

Doch das Hören ist nur eine Seite der Medaille. Musik entsteht durch das Musizieren, wenn Menschen singen, trommeln oder in die Tasten ihres Klaviers greifen. „Wir wollten daher wissen, ob Menschen, die tagtäglich Musik produzieren, dabei ebenfalls diesem Regelwerk folgen“, sagt Sammler. Beim Musizieren kommen nun zwei Komponenten zusammen: eine musikalische Idee – also die Vorstellung davon, wie Musik klingen soll und welche Harmonien wir als stimmig empfinden; und dann gilt es, diese Idee mithilfe einer Bewegung umzusetzen – etwa in Fingersätze auf einer Klaviertastatur, in bestimmte Griffe auf den Löchern einer Flöte oder beim Singen in die Bewegung von Kehlkopf und Stimmbändern.

Kognition und Motorik treffen sich hier also und beeinflussen einander wechselseitig. Das entspricht der viel beachteten These des „Embodiment“, die besagt, dass Körper und Geist zusammenwirken. Motorische Vorgänge sind demnach nicht allein das Ergebnis kognitiver Prozesse – die Motorik unterstützt auch die Kognition. Ein einfaches Beispiel: Kinder lernen zählen, indem sie die Finger benutzen. Die Bewegung einer bestimmten Anzahl von Fingern unterstützt demnach das Konzept des Zählens im Gehirn. Pianistinnen und Pianisten realisieren die musikalische Idee durch die Position der Finger auf der Tastatur und das Anschlagen der Tasten. Die Bewegung der Hände und Finger folgt dabei den grammatischen Regeln der Musik. Umgekehrt verstärkt die motorische Ausführung die musikalische Idee, also die Vorstellung davon, wie es richtig klingt. Tatsächlich gibt es zahlreiche Belege dafür, dass bei Musikerinnen und Musikern das auditorische und das motorische System sehr eng miteinander verknüpft sind.

Beim Klavierspielen geht es aber nicht nur darum, irgendwie die richtigen Tasten zu treffen. Theoretisch ließe sich ein Akkord auf der Klaviertastatur mit einer Vielzahl verschiedener Hand- und Fingerbewegungen anspielen. In der Praxis hängt der Fingersatz aber auch von ökonomischen

Aspekten ab – wie schnell sich ein Akkord mit einem bestimmten Fingersatz umsetzen lässt und wie man von da aus am besten zum nächsten Akkord kommt – und davon, welcher Ausdruck vermittelt werden soll: Der Daumen hat mehr Kraft als beispielsweise der Ringfinger, was sich auf die Lautstärke auswirkt. Pianistinnen und Pianisten koordinieren beim Musizieren also mindestens zwei Planungsstufen: welchen Akkord, also was sie spielen müssen, um das musikalische Regelwerk in ihren Köpfen zu erfüllen, und wie sie diesen Akkord greifen.

---

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Menschen verinnerlichen die musikalischen Regeln ihrer Kultur ähnlich wie die Grammatik ihrer Sprache und wenden sie intuitiv an.

Messungen der Hirnaktivitäten beim Klavierspielen zeigen, dass Pianisten sowohl auf eine Verletzung der Harmonieregeln als auch auf regelwidrige Fingersätze reagieren; beides wird im Gehirn getrennt voneinander verarbeitet.

Beim gemeinsamen Musizieren synchronisieren sich die Hirnwellen von Musikern, offenbar um das Zusammenspiel zu koordinieren.

---

Um herauszufinden, wie das gelingt, beobachtete Sammler mit ihrem Team mithilfe von EEG-Messungen die Gehirnaktivitäten von Pianisten beim Spielen. Alle Teilnehmenden hatten zehn Jahre oder länger eine klassische Klavierausbildung genossen. Ihre Aufgabe war es nun, noch nicht eingeübte Harmoniefolgen zu spielen, und zwar entsprechend der Bewegung von Händen, die sie auf einem Bild-

schirm sahen. „Wir haben bewusst darauf verzichtet, nach Noten spielen zu lassen, weil das weitere Prozesse ins Spiel gebracht hätte, die für uns im Experiment nur sehr schlecht kontrollierbar wären, weil zum Beispiel nicht alle gleich gut Noten lesen und vom Blatt spielen können“, erklärt die Wissenschaftlerin das Vorgehen. „Mein Chorleiter hat immer gesagt: Ihr müsst auswendig singen, damit ihr euch auf die Musik und den Zusammenklang konzentriert und nicht auf die Notenblätter.“

## Schlussakkord mit Hindernis

Die vorgegebenen Sequenzen, die es im Experiment zu spielen galt, waren alle musikalisch stimmig. Der Schlussakkord dagegen konnte passend sein oder einen Fehler enthalten: In diesem Fall handelte es sich entweder um eine unpassende Harmonie, also einen Grammatikfehler, oder um einen ungewöhnlichen Fingersatz, den geübte Pianisten so nicht spielen würden, da er umständlich zu greifen ist. Wie würden die Gehirne der Probanden auf die Fehler reagieren? Tatsächlich machten sich beide Fehlerarten im EEG bemerkbar, etwa in einer Verzögerung beim Spielen. Allerdings zeigte sich, dass Fehler im Fingersatz immer zu einer Verzögerung führten. Dagegen erwiesen sich Fehler in der Harmonie vor allem dann als störend, wenn die Musizierenden die Idee der Sequenz verstanden hatten – wenn sie also nach ein paar Akkorden ein Gespür dafür entwickelt hatten, wie es weitergehen müsste. „Das zeigt uns, dass das Musikerhirn die beiden Planungsstufen ‚Was wird gespielt?‘ und ‚Wie spiele ich es?‘ tatsächlich trennt“, sagt Sammler.

Diese Erkenntnis reichte Sammler aber noch nicht. „Im EEG können wir nur nachvollziehen, dass sich die Gehirnaktivitäten ändern, aber nicht, wo diese Prozesse ablaufen – dafür brauchen wir die MRT, die Magnetresonanztomografie“, erklärt sie. Die Psychologin tüftelte in Zusammenarbeit



mit einigen Kolleginnen und Kollegen und der Blüthner Pianofabrik in Leipzig ein außergewöhnliches Experiment aus: Sie schickte Pianisten samt Klavier in die Röhre. Dafür ließ sie eigens eine Art Miniklavier mit nur 27 Tasten anfertigen, das die Probanden dann, auf dem Rücken liegend, im Scanner spielen konnten. Ein Zweiwegespiegel sorgte dafür, dass die Probanden ihre eigenen Hände auf der Tastatur sehen konnten und gleichzeitig die Hände, die – wie schon im vorherigen Experiment – auf einem Monitor die Akkorde vorgaben. Erneut galt es, kurze Sequenzen zu spielen, die am Ende entweder einen Harmoniefehler oder einen Fehler im Fingersatz enthalten konnten.

Dabei bestätigte sich, was die Forschenden bereits aus den vorherigen Experimenten geschlussfolgert hatten: Die beiden Planungsschritte – nämlich das Was und das Wie – liefen getrennt voneinander ab. Sie aktivierten im Gehirn unterschiedliche neuronale Netzwerke. Für die Fingerbewegung wurden vorwiegend motorische Areale beansprucht, während die Planung der musikalischen Idee insbesondere Regionen im Stirnhirn und im Schläfenlappen aktivierte – von denen Experten vermuten, dass sie unter anderem als Speicher für Regelwissen dienen. „Das Spannendste war allerdings, dass bei beiden Anforderungen das Broca-Areal aktiv war. Diese Region im Gehirn ist vielen lediglich als Sprachzentrum bekannt, sie spielt jedoch auch eine Rolle bei der Handlungsplanung – und zwar egal, ob wir einen Satz formulieren, Kaffee kochen oder eben musizieren wollen“, sagt Sammler.

Forschungsarbeiten zu diesem Areal haben Erstaunliches über das Planen von Handlungen zutage gebracht. Demnach steht am Anfang die Idee, also „etwas erzählen“, „Kaffee kochen“ oder „eine Melodie spielen“. Der vordere Teil der Hirnregion setzt diese Idee in Verhaltensregeln um: Welcher Handlungsschritte bedarf es, um Kaffee zu kochen? Innerhalb des Broca-Areals, anatomisch gesehen

FOTOS: MPI FÜR KOGNITIONS- UND NEUROWISSENSCHAFTEN (2)

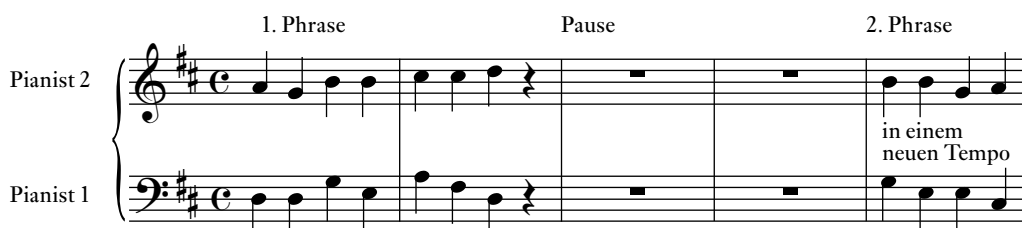
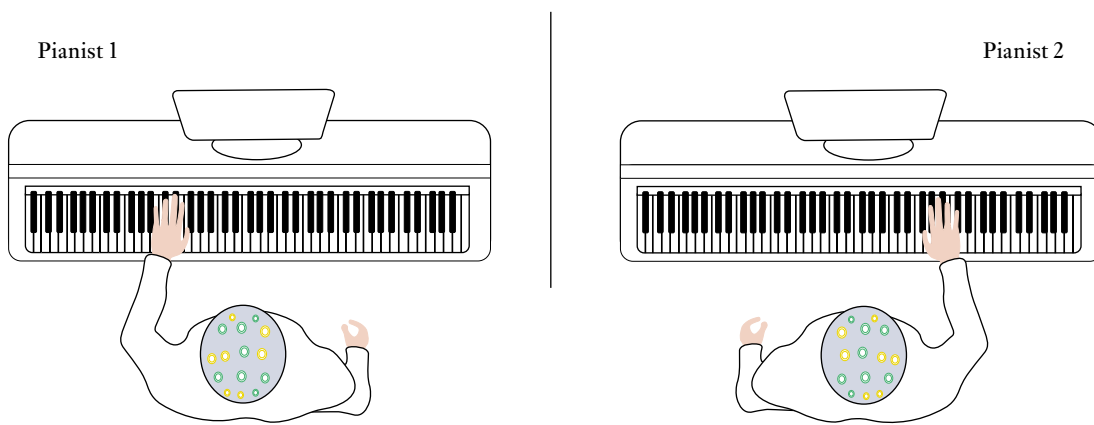


Spezialanfertigung: Ein eigens konstruiertes Miniklavier ermöglicht es, einen Pianisten beim Spielen im MRT zu untersuchen. Dadurch können die Forschenden nachvollziehen, welche Gehirnbereiche beim Musizieren besonders aktiv sind.

von vorne nach hinten verlaufend, wird die Planung dann immer feingliedriger. Zum Beispiel: Wie muss ich den Kaffee in die Maschine geben, um die richtige Menge zu dosieren? „Dieses Muster konnten wir auch beim Musizieren beobachten: Die Planung beginnt demnach bei der musikalischen Idee und wird dann immer feiner bis zur konkreten Bewegung der Finger auf der Klaviertastatur“, erklärt Sammler. Die Hand-

lungsplanung beim Musizieren funktioniert also genau wie bei Alltagshandlungen: Es erfolgt eine Übersetzung vom Was zum Wie – von der musikalischen Idee zur Bewegung auf dem Klavier.

So spannend diese Erkenntnisse sind: Sie konzentrieren sich ausschließlich auf die Soloperformance, also darauf, was beim einzelnen Musiker passiert, der sein Instrument spielt. „Das ist



stärkere Synchronisierung der Hirnwellen

↑

schwächere Synchronisierung der Hirnwellen

↓

In der Pause planen beide Pianisten für die 2. Phrase das gleiche Tempo.

In der Pause planen die Pianisten für die 2. Phrase unterschiedliche Tempi.

66

im Grunde genommen aber eine sehr reduzierte Situation“, erklärt Daniela Sammler. „Denn evolutionsbiologisch gesehen, war Musik sehr wahrscheinlich etwas, was man gemeinsam gemacht hat, in der Gruppe.“ Konzerte, bei denen einzelne Musiker ein Publikum unterhalten, sind dagegen eine verhältnismäßig neue Erfindung. Musik diente ursprünglich dem Miteinander – etwa bei der Kommunikation zwischen Mutter und Baby. Oder um einen Partner zu finden. Oder auch, um Gruppenzugehörigkeit zu pflegen. Damit geben Untersuchungen mit einzelnen Probanden zwar

Aufschluss über grundlegende Prinzipien, nach denen das Denkorgan arbeitet. Doch letztlich ist das nur ein kleiner und möglicherweise recht eingeschränkter Aspekt des Gesamtbilds. „Dies betrifft nicht nur die Musik, sondern sämtliche Handlungen, bei denen Menschen zu zweit oder in Gruppen interagieren“, sagt Sammler. „Die finnische Neurowissenschaftlerin Riitta Hari ging sogar so weit zu sagen, dass Gehirne vor allem für die Interaktion gemacht sind.“

Interaktion steht also im Zentrum der Kognition. Doch noch ist recht wenig

**Synchronisationstest:** Zwei Pianisten spielen gleichzeitig, zunächst in einheitlichem Tempo. Nach der Pause sollen sie das Tempo ändern. Dafür haben beide entweder die gleiche Vorgabe oder unterschiedliche Anweisungen. Im Ergebnis verstärkt sich bei gleicher Vorgabe zur Beginn der Pause die Synchronisation der Gehirnwellen, bei unterschiedlichen Anweisungen schwächt sie sich dagegen ab. Warum danach noch innerhalb der Pause das vorhergehende Synchronisationsniveau erreicht wird, ist nicht abschließend geklärt.

darüber bekannt, wie sie auf neuronaler Ebene funktioniert. Was bekannt ist: Gehirne beginnen im Gleichtakt zu schwingen, wenn Menschen miteinander interagieren. Das erscheint im EEG als synchronisierte Hirnwellen und passiert eigentlich bei allen gemeinsamen Handlungen – egal, ob wir miteinander spazieren gehen, tanzen, eine Debatte führen oder eben musizieren. Doch synchronisieren sich die Gehirnwellen, weil wir uns beispielsweise im Gleichtakt bewegen oder dieselbe Melodie spielen? Ist der Effekt eine Folge davon, dass wir gleichzeitig ähnliche Dinge tun? Oder handelt es sich um einen Mechanismus, der die Interaktion unterstützt?

## Entscheidend fürs Zusammenspiel

Um dieser Frage nachzugehen, untersuchten Daniela Sammler und ihr Team erneut Pianisten – diesmal im Duett. Immer zwei Freiwillige bekamen die Aufgabe gestellt, gemeinsam eine Melodie zu spielen, während die Forschenden per EEG die Hirnwellen erfassten. Dabei übernahm eine Person den Part der linken Hand und die andere den der rechten. Harmoniefolge und Tempo waren vorgegeben und passten zueinander – bis zu einer Pause im Stück. Danach hatten die Musizierenden die Anweisung, in einem anderen Tempo weiterzuspielen, wobei die beiden teilweise gegensätzliche Vorgaben bekamen. Das beeinflusste wiederum die Synchronizität der Gehirne. Planten beide mit der gleichen Anweisung – schneller oder langsamer –, war sie hoch. Waren unterschiedliche Tempi vorgegeben, wichen auch die Gehirnwellen voneinander ab – und zwar umso mehr, je unterschiedlicher das geplante Tempo nach der Pause war.

„Wir interpretieren dieses Ergebnis so, dass die Synchronisation der Hirnwellen kein Nebenprodukt des Zusammenspiels ist, sondern ein Mechanismus, mit dem die Musiker das



FOTO: KATRIN BINNER

Sorgfältig vorbereitet: Forschungsgruppenleiterin Daniela Sammler richtet eine EEG-Haube für ein Experiment mit einer Pianistin her.

Zusammenspiel koordinieren“, sagt Daniela Sammler. „Und das gilt dann sehr wahrscheinlich nicht nur für die Musik, sondern auch für andere Handlungen, bei denen es auf gute Interaktion ankommt.“ Hier geht es also um generelle Mechanismen zwischenmenschlicher Zusammenarbeit. Noch vermag die Arbeit der Frankfurter Max-Planck-Forscherin lediglich Hinweise darauf zu geben, dass

die Synchronisation für das Zusammenspiel entscheidend ist. Wo sie entsteht, kann derzeit niemand sagen. „Dazu müssten wir beide Pianisten gleichzeitig in zwei verschiedene MRT-Röhren legen“, sagt Daniela Sammler. Das sei natürlich eine große logistische Herausforderung, räumt sie ein, aber sie ist sehr zuversichtlich, dass ihr das gelingt: „Das kommt auch noch!“

Stichlingsmännchen  
zeigen sich zur Laichzeit  
prächtigt gefärbt,  
mit roter Kehle und  
Brust sowie leuchtend  
blauer Iris.



# EIN FISCH – MIT ALLEN WASSERN GEWASCHEN

TEXT: ELKE MAIER

Dreistachlige Stichlinge leben sowohl im Salz- als auch im Süßwasser. Als am Ende der letzten Eiszeit die Gletscher schmolzen, entstanden neue Seen, und Stichlinge aus dem Meer fanden darin neue Lebensräume. Felicity Jones und ihr Team am Tübinger Friedrich-Miescher-Laboratorium der Max-Planck-Gesellschaft untersuchen, wie das Genom der Fische sich im Zuge der Anpassung verändert. 12 000 Jahre alte Stichlingsknochen liefern Einblicke in die Frühphase dieses Wandels.

Die Geschichte beginnt mit einem Zufallsfund: Im Frühjahr 2018 machte sich ein Geologenteam des Geological Survey of Norway (NGU) auf die Reise in Norwegens äußersten Norden. Ziel der Expedition war es, Bohrkern aus dem Sediment küstennaher Seen zu entnehmen, um so ein Bild von den Meeresspiegelschwankungen gegen Ende der letzten Eiszeit zu bekommen. Als der Geologe Anders Romundset seine Sedimentproben im Labor durch ein feines Sieb filtrierte, fand er darin nicht nur Algen und andere Pflanzenreste: In den Maschen hatten sich auch nur wenige Millimeter große, knöcherne Überreste von Fischen verfangen.

Die Knöchelchen und die winzigen Stacheln waren so gut erhalten, dass der Wissenschaftler gleich wusste, mit wem er es zu tun hatte: mit dem Dreistachligen Stichling (*Gasterosteus aculeatus*). Die vier bis sechs Zentimeter großen Fische kommen bis heute im Meer und in den Seen Skandinaviens vor. Mithilfe der Radiokarbonmethode ließ sich ein Alter von rund 12 000 Jahren für die Knochen ermitteln. Sie stammen also aus einer Zeit, in der weite Teile Nordeuropas noch von mächtigen Eispansern bedeckt waren.

Als gegen Ende der Eiszeit die Gletscher schmolzen und eine gewaltige Eislast wegfiel, begann sich die Landmasse nach und nach über den Meeresspiegel zu heben. Buchten wurden dabei vom Meer getrennt und füllten sich mit Süßwasser, sodass neue Seen entstanden. In einem von ihnen hat einstmalig der Stichling gelebt, von dem die Knochen und Stacheln stammen. Eingebettet in das Sediment am Seegrund haben die knöchernen Relikte

die Jahrtausende überdauert. Die Geologen übergaben ihren Fund an Andrew Foote, Evolutionsökologe an der Norwegian University of Science and Technology in Trondheim. Foote, ein Experte für alte DNA, nutzte die Chance. In einem Speziallabor an der Universität Kopenhagen machten er und sein Kollege Tom Gilbert sich daran, in den Knochen nach Resten der Erbsubstanz zu suchen. Eine der Schwierigkeiten war, dass die Proben längst nicht nur Stichlings-DNA enthielten, sondern auch DNA-Stücke anderer Organismen – Pflanzen und Bakterien etwa, die damals in derselben Umgebung lebten. In diesem Sammelsurium machten die gesuchten Fragmente letztlich nur ein Prozent aus. Und dennoch gelang es Andrew Foote mit großem Aufwand, die Stichlings-DNA herauszufischen und zu sequenzieren.

Für Felicity Jones, Forschungsgruppenleiterin am Tübinger Friedrich-Miescher-Laboratorium war der Erfolg ihres norwegischen Kollaborations-



partners Foote ein Glücksfall. Gemeinsam mit ihrem Team untersucht die Australierin die Grundlagen von Evolution. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wollen herausfinden, welche molekularen Mechanismen dafür sorgen, dass sich Organismen an neue Lebensräume anpassen oder sogar neue Arten bilden können. Als Modellorganismen sind die Stichlinge dafür ideal: Im Laufe der letzten 10 000 bis 20 000 Generationen sind Meeresstichlinge in viele verschiedene Süßgewässer wie Seen, Flüsse und Sümpfe eingewandert und haben sich an die neuen Bedingungen angepasst. So sind diese kleinen Fische heute in den gemäßigten Klimazonen der nördlichen Hemisphäre weit verbreitet.

„Das Spannende für uns ist, dass Stichlinge vom Meer aus, vielfach unabhängig voneinander, neue Süßwasserlebensräume besiedelt haben“, sagt Felicity Jones, die vor ihrer Tübinger Zeit schon in Schottland, Neuseeland und den USA geforscht hat. „So können wir dieselben Fragen in mehreren parallelen Systemen untersuchen und damit ausschließen, dass es sich bei den genetischen Anpassungen, die wir entdecken, lediglich um Einzelfälle handelt.“ Im Zuge der Anpassung an die neue Umgebung kam es an verschiedenen Standorten immer wieder zu ganz ähnlichen Veränderungen in der Gestalt, im Verhalten oder in der Physiologie der Fische – ein Prozess, der als parallele Evolution bekannt ist. Wie in einem riesigen Freilandlabor können die Forschenden daher an den Stichlingen die grundlegenden molekularen Mechanismen herausarbeiten, die dafür sorgen, dass sich Organismen an neue Lebensräume anpassen können.

In seinem Hauptwerk, *On the Origin of Species*, lieferte Charles Darwin vor mehr als 160 Jahren erstmals eine plausible Erklärung dafür, wie die Vielfalt des Lebens entstanden ist. Demnach stammen alle heutigen Arten von gemeinsamen Vorfahren ab, deren Nachkommen sich im Laufe von Jahrmillionen auf die verschiedenen Lebensräume verteilt und in un-

terschiedliche Abstammungslinien aufgespalten haben. Triebfeder dieser Entwicklung ist die natürliche Auslese: Von allen Nachfahren eines Lebewesens haben diejenigen, die am besten an ihre Umwelt angepasst sind, den größten Fortpflanzungserfolg. Sie geben daher ihre erblichen Merkmale bevorzugt an die nachfolgende Generation weiter.

---

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Stichlinge leben im Salz- und im Süßwasser. Vom Meer aus haben sie vielfach neue Süßwasserlebensräume besiedelt.

Die kleinen Fische sind ideale Modellorganismen, um zu erforschen, wie sich Lebewesen an veränderte Umwelten anpassen und sogar neue Arten bilden können.

Max-Planck-Forschende haben DNA aus 12 000 Jahre alten Stichlingsknochen analysiert, die in eiszeitlichem Seesediment in Norwegen gefunden wurden. Die Daten geben Einblick in die Evolutionsgeschichte skandinavischer Stichlinge.

---

Berühmtes Exempel für Darwins Theorie sind die Finken des Galapagosarchipels. Von einer Stammart ausgehend, haben die Vögel auf den verschiedenen Inseln ganz unterschiedliche Schnabelformen hervorgebracht, je nachdem, welche Nahrung sie nutzten. Eine solche Aufspaltung bezeichnen Evolutionsbiologen als adaptive Radiation. „Die Stichlinge sind ein weiteres Beispiel, nur viel besser“, sagt Felicity Jones und lacht. Denn anders als die Galapagos-Finken tun sie den Forschenden den Gefallen, das evolutionäre Schauspiel der Aufspaltung gleich auf mehreren Bühnen aufzuführen. So können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das Spektakel immer wieder

beobachten und so ihre Erkenntnisse überprüfen.

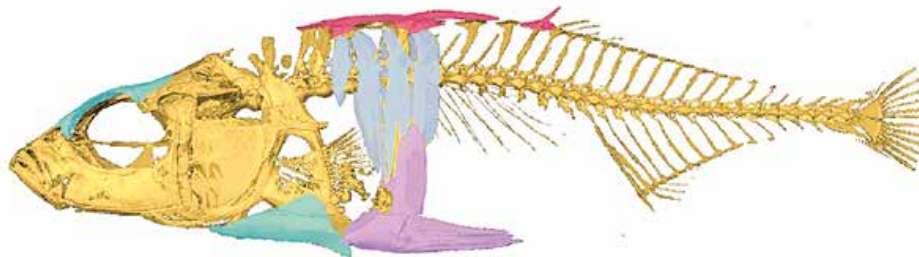
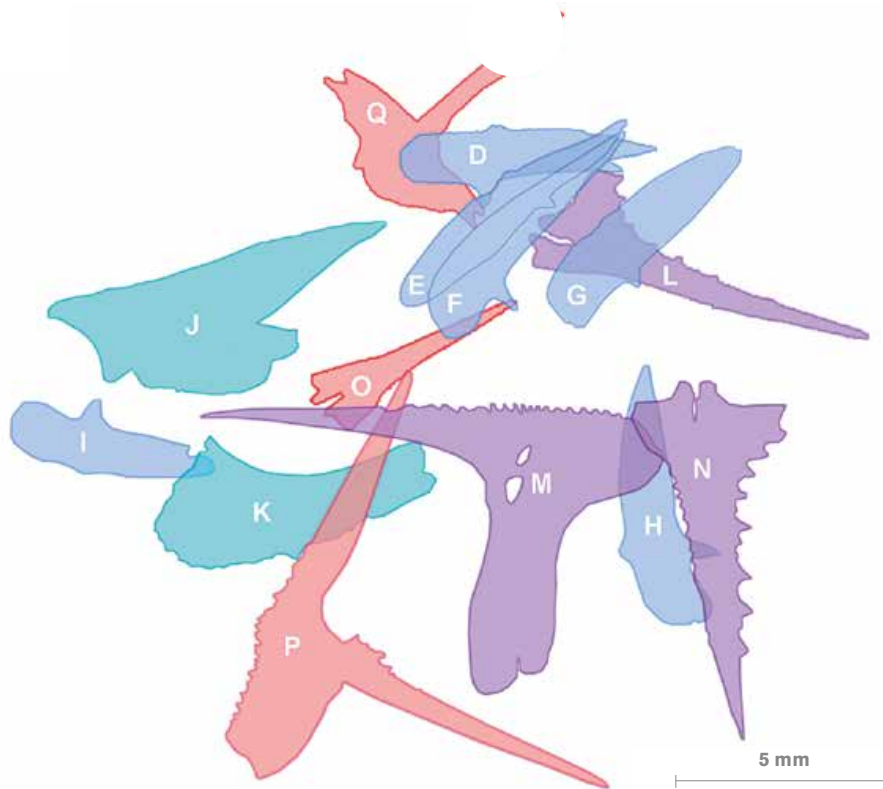
Wie sich die Stichlinge im Zuge der Anpassung verändern, das zeigt sich eindrucksvoll in der Ausbildung der Knochenplatten an den Körperseiten, die dem Schutz vor Fressfeinden dienen. Individuen aus dem offenen Meer, die sich vor Räubern kaum verstecken können, setzen zu ihrer Verteidigung auf eine umfangreiche Panzerung. Ihre Artgenossen im See, die Unterschlupf im Pflanzendickicht finden, können sich diesen Materialaufwand sparen. Sie rüsten ab und tragen schließlich nur noch wenige Platten vorne am Rumpf.

Seit Darwins Zeiten hat die Evolutionsbiologie gewaltige Fortschritte gemacht. Dank moderner Analyseverfahren können Forschende heute im Genom nach den charakteristischen Spuren fahnden, die die Evolution dort hinterlassen hat. „Die meisten unserer Erkenntnisse darüber, wie das Genom funktioniert, stammen aus dem Labor, von eigens gezüchteten Modellorganismen. Dagegen wissen wir noch immer recht wenig darüber, wie natürlich vorkommende genetische Unterschiede die Evolution von Freilandpopulationen beeinflussen“, sagt Felicity Jones.

## Ein Fenster in die Vergangenheit

Der prähistorische Knochenfund eröffnete dem Tübinger Team und seinen Forschungspartnern ganz neue Möglichkeiten: Erstmals hatten sie einen Urahn der Süßwasserstichlinge vor sich, und dieser Fisch, der vor rund 12 000 Jahren gelebt hat, gab auch noch genetische Informationen preis. „Nach unserem Kenntnisstand sind das die ältesten Fischknochen, von denen jemals Genomdaten gewonnen wurden“, sagt Felicity Jones. „Sie öffnen uns ein Fenster in die Vergangenheit, sodass wir nachvollziehen können, welche genetische Variation die Tiere mitbrachten, als sie sich an ihre neuen Lebensräume anpassen.“

GRAFIK: ANDY FOOTE, MELANIE KIRCH, ANDERS ROMUNDSET



71

Relikte der Eiszeit: Um sie zu identifizieren, verglichen die Forschenden die gefundenen Skelettelemente (oben) mit Röntgenaufnahmen eines heutigen Stichlings (unten). So konnten sie die alten Knochen einem einzigen Individuum zuordnen.

Die knöchernen Relikte fanden sich in einer Sedimentschicht, welche den Übergang vom Salz- zum Süßwasser markiert. Als gegen Ende der Eiszeit einzelne Meeresbuchten nach und nach vom Meer getrennt wurden, blieben Stichlinge in den isolierten Gewässern zurück. Es gelang ihnen, sich an die neuen Gegebenheiten des Brackwassers anzupassen und sich fortzupflanzen. In den unterschiedlichen Gewässern entstanden so im Laufe der Zeit zahlreiche neue Typen,

die sich von ihren Verwandten im Meer unterschieden. Rein äußerlich variierten die Fische in ihrer Körpergröße und der Pigmentierung, in der Länge ihrer Rückenstacheln sowie in der Größe und Anzahl der Knochenplatten.

Um sich ein Bild davon zu machen, was sich auf genetischer Ebene verändert hatte, verglichen die Forscherinnen und Forscher die Erbsubstanz des eiszeitlichen Stichlings mit der seiner

Nachfahren. Zu diesem Zweck analysierten sie Stichlinge aus zwei küstennahen Seen südlich der Stadt Hammerfest. Aus einem der Seen stammt auch der Knochenfund, der die prähistorische DNA beisteuerte. Zusätzlich sequenzierten die Forschenden auch die Genome von Meeresstichlingen aus derselben Gegend.

Der Vergleich der Erbsubstanz ergab schließlich, dass der Eiszeitfisch seinen heutigen Artgenossen aus dem





Fisch in Farbe: Die Forschenden haben ein Stichlingsskelett eingefärbt, um einzelne Elemente sichtbar zu machen. Süß- und Salzwasserstichlinge unterscheiden sich etwa in der Stachelnänge oder der Größe und Zahl der Knochenplatten, die sie zum Schutz vor Fressfeinden am Körper tragen.

72

Meer genetisch stark ähnelte: „Die Knochen enthielten vor allem solche Genvarianten, die für ein Leben im Salzwasser von Vorteil sind“, erläutert Melanie Kirch, Doktorandin in Felicity Jones' Arbeitsgruppe, die einen Großteil der Genomdaten ausgewertet hat. Daneben fanden sich aber auch Varianten, die bereits eine Anpassung an das Süßwasser erkennen ließen.

Solche Genvarianten finden sich vereinzelt auch unter den heutigen Meerestichlingen. Die Forschenden gehen davon aus, dass Letztere sich hin und wieder mit Artgenossen aus dem Süßwasser paaren, etwa in den Mündungen von Flüssen. Dadurch gelangen immer wieder Süßwasser-Genvarianten in die Meerespopulation. Für die marinen Stichlinge sind diese Varianten nutzlos oder sogar unvorteilhaft und breiten sich daher nicht aus. Bei der Besiedlung neuer Süßwasserlebensräume erweisen sie sich dagegen als Joker: Kann die Evolution auf solche vorgefertigten Bausteine zugreifen, ist eine Anpassung in kürzester Zeit – im Fall der Stichlinge innerhalb von wenigen Jahrzehnten – möglich. Müssen die passenden Genvari-

anten dagegen erst zufällig per Mutation neu entstehen, können mitunter Millionen von Jahren vergehen.

Der Genomvergleich lieferte noch weitere Details zum Werdegang der Süßwasserstichlinge. Er ergab, dass die Fische aus den beiden Seen genetisch weniger divers waren als ihre Vorfahren aus dem Meer. Das lag zum einen daran, dass die vereinzelt Individuen, die damals die Seen neu besiedelten, lediglich einen kleinen Teil der Genvarianten mitbrachten, die unter den Meerestichlingen vorkamen. Zum anderen verschwanden in den neu gegründeten Populationen manche Varianten über die Zeit zufallsbedingt wieder aus dem Genpool – ein Prozess, der als Gendrift bekannt ist. „Allein durch Zufall sind auf diese Weise sogar solche Varianten abhandengekommen, die für ein Leben im Süßwasser vorteilhaft wären“, erklärt Felicity Jones. Eine solche starke genetische Verarmung – typisch für kleine Gründerpopulationen – bezeichnen Biologen bildhaft als „genetischen Flaschenhals“.

Für die Süßwasserstichlinge war dieser Flaschenhals folgenreich: Genetische

Variation ist das Material, aus dem die Evolution neue Anpassungen hervorbringt. Sind viele unterschiedliche Genvarianten vorhanden, kann sie aus dem Vollen schöpfen. Bei den Fischen aus den beiden Seen war die Variation dagegen stark verringert: „Wir vermuten, dass sie nicht so gut an ihren Lebensraum angepasst sind, wie sie es eigentlich sein könnten“, interpretiert Jones die Ergebnisse.

Felicity Jones und ihr Kollaborationspartner Andrew Foote sind begeistert von den neuen Möglichkeiten, die sich mit der eiszeitlichen DNA ergeben. Sie möchten in Zukunft die Evolutionsgeschichte der skandinavischen Stichlinge genauer erforschen. Eines ihrer Ziele ist es, noch mehr prähistorische Stichlingsknochen aus jüngeren Sedimentschichten genetisch auszuwerten. „Wenn wir nicht nur Knochen von einem einzelnen Fisch hätten, sondern von mehreren Individuen, die im Abstand von Hunderten von Jahren gelebt haben, könnten wir direkt nachverfolgen, wie sich das Genom über die Zeit veränderte, nachdem die Stichlinge in ihrem neuen Lebensraum angekommen waren“, sagt Felicity Jones.

←



# FORSCHUNG LEICHT GEMACHT

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

[www.mpg.de/mpf-mobil](http://www.mpg.de/mpf-mobil)

[www.mpg.de/mpforschung](http://www.mpg.de/mpforschung)

KOSTENLOS  
DOWNLOADEN!





Den Spiegel vorhalten: Wie Eduardo Sampaio bei seinen Tauchgängen vor den Kapverden beobachtet hat, reagieren Kraken auf ihr eigenes Spiegelbild: Sie zeigen schnelle Farbwechsel und greifen ihr Gegenüber schließlich an.

Max-Planck-Forschende kooperieren mit Partnern in mehr als 120 Ländern. Hier schreiben sie über ihre persönlichen Erfahrungen und Eindrücke. Eduardo Sampaio vom Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie in Konstanz segelte an Bord der Captain Darwin in den Gewässern vor den Kapverden – knapp 200 Jahre nachdem Charles Darwin die Inseln vor der westafrikanischen Küste besucht hatte. Der Max-Planck-Forscher erzählt von einer vielfältigen, aber bedrohten Unterwasserwelt, vom Paarungsverhalten der Kraken und davon, wie sich auch mit Fischen trefflich Katz und Maus spielen lässt.

Es war die Cholera, die Charles Darwin im Januar 1832 auf die Kapverdischen Inseln führte: Der junge Naturforscher war kurz zuvor an Bord der HMS Beagle zu seiner Weltumsege-

lung aufgebrochen. Aus Furcht, die Besatzung könnte die Krankheit einschleppen, durfte das Schiff nicht wie geplant in Teneriffa anlanden. Kapitän Robert FitzRoy segelte daher weiter zu den Kapverden. In den Gezeitentümpeln am Strand stieß Darwin auf Tintenfische, die er mit großem Interesse beobachtete und in seinem Buch *Die Fahrt der Beagle* verewigte.

190 Jahre später war ich für zehn Tage an Bord der Captain Darwin zu Gast. Das 12-Meter-Segelboot ist im September 2021 für vier Jahre in See gestochen und nimmt dieselbe Route wie damals die HMS Beagle. Initiator des Projekts ist der französische Filmemacher Victor Rault. Er möchte herausfinden, wie sich Ökosysteme weltweit seit Darwins Zeiten verändert haben, und, wo möglich, einen Ausblick auf die Zukunft geben: Wohin bewegen wir uns angesichts des voranschreitenden Klimawandels? An den verschiedenen Stationen der Reise trifft Victor Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die dort an denselben Organismen forschen wie

einst Darwin. In einer Serie von YouTube-Videos dokumentiert er die gesamte Reise.

Die Tintenfische waren meine Eintrittskarte zu diesem exklusiven Segeltörn. Neben unserem Kapitän Victor waren Martin, ein routinierter Segler, und Nico, ein erfahrener Taucher, mit an Bord. Am ersten Tag war das Meer rau, und mein Magen machte mir zu schaffen. Doch schon am zweiten Tag hatte ich mich an das Geschaukel gewöhnt. Wir kreuzten vor den unbewohnten Ilhas Desertas in einem Meeresschutzgebiet, wo ich das Jagdverhalten des *Octopus vulgaris*, des Gemeinen Kraken, studieren wollte. Anderswo hatte ich bereits die erstaunliche Kooperation zwischen einem Kraken und mehreren Fischen beobachtet, die sich zur Jagd zusammuntun: Die Fische machen die Beutetiere ausfindig, die der Oktopus dann mit seinen langen Armen selbst aus den engsten Felsspalten hervorzerzt. Wenn es dann ans Teilen geht, herrscht allerdings längst nicht immer Einigkeit – und so kommt es vor,



## KAPVERDEN



dass der Krake die gierigen Fische mit gezielten Hieben eines seiner langen Arme in Schach hält. An Bord hatten wir Tauchflaschen und einen Kompressor dabei. Nico und ich machten zwei bis drei Tauchgänge am Tag. Doch wie so oft bei der Freilandarbeit lief alles anders als geplant: Wir bekamen keine jagenden Tintenfische zu Gesicht, dafür aber viele in Paarungssituation. Kurzerhand änderte ich meine Pläne und installierte Unterwasserkameras, um das bisher wenig erforschte Fortpflanzungsverhalten der Kraken zu filmen. Ganz nebenbei sind uns auch spannende Beobachtungen an Fischen gelungen: So haben wir entdeckt, dass Meerbarben auf die schnellen Bewegungen eines Laserpointers reagieren – bald war unter Wasser ein wildes Katz- und Maus-Spiel in Gang.

Die Stimmung an Bord der Captain Darwin war entspannt, und es gab viel zu lachen. Morgens um sechs mit einer Tasse Kaffee von Deck aus den Sonnenaufgang über dem Meer anzuschauen, hat mich jedes Mal aufs

Neue begeistert. Nach getaner Arbeit haben wir dann das Videomaterial des Tages gesichtet oder bei einem Feierabendbier auf dem weiten Ozean über die Welt diskutiert. In meiner freien Zeit habe ich Darwins Buch *Über die Entstehung der Arten* gelesen, in das seine Erkenntnisse aus der Reise mit der Beagle eingeflossen sind. Wie hätte er wohl gestaunt, wenn er damals eine Tauchausrüstung gehabt hätte!

Denn während die Inseln karg und wüstenhaft sind, zeigt sich die Unterwasserwelt bunt und vielfältig. Auf den ersten Blick scheint sie intakt, und doch hat sie sich seit Darwins Zeiten bereits tiefgreifend verändert. Riesige Fangflotten aus Europa und China haben die Fischbestände vor der westafrikanischen Küste besorgniserregend dezimiert. Die Erderwärmung setzt auch dem Leben im Meer zu. Wie es hier in 200 Jahren aussehen wird? Alles hängt davon ab, ob wir es schaffen, den Fischfang zu regulieren und den Ausstoß von Treibhausgasen in den Griff zu bekommen.



FOTO: PRIVAT

Eduardo Sampaio

33, hat an der Universität Lissabon Biologie studiert und in dieser Zeit ein Faible für Tintenfische entwickelt. Als Gastwissenschaftler am Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie in Konstanz erforscht er die Entscheidungsfindung und das Sozialverhalten der intelligenten Meerestiere. Im Anschluss an seine Promotion wird er als Postdoc in der Abteilung für Kollektivverhalten seine Studien fortsetzen.

## KARRIERERATGEBER DER ANDEREN ART

Welche Faktoren sind im Berufsleben wirklich wichtig? Nach Auffassung von Matthias Sutter kann die Verhaltensökonomie hier ganz neue Einsichten bieten. Sie nutzt empirische Methoden, um die Motive menschlichen Handelns zu ergründen und die daraus folgenden Entscheidungen besser zu erklären. Der Max-Planck-Direktor präsentiert eine ganze Reihe verhaltensökonomischer Befunde, die auf sämtlichen Hierarchieebenen und allen Stufen des Berufslebens Wirkung entfalten. Beispielsweise bei Auswahlverfahren: Wer es in das Finale eines Musikwettbewerbs geschafft hat, muss darauf hoffen, dass er nicht gleich zu Beginn vorspielen muss. Denn von zwei Finalisten, die am selben Tag auftreten, wird der später auftretende Finalist im Schnitt um einen Platz besser gewertet. Ein höherer Anteil von Frauen in wissenschaftlichen Kommissionen verringert interessanterweise die Erfolgchancen von Kandi-

datinnen, weil die männlichen Kommissionsmitglieder Kandidatinnen deutlich schlechter bewerten, sobald Frauen der Kommission angehören. Und die Wettbewerbsbereitschaft von Männern ist größer als die von Frauen, weil einerseits Frauen risikoscheuer sind und Männer sich andererseits systematisch überschätzen – ein Befund, der durch zahlreiche Studien bestätigt wurde. Dass sich dem durch eine Frauenquote entgegenwirken lässt, konnte der Autor im Rahmen eigener Studien zeigen, und er fordert, dass über dieses Thema unbedingt mit mehr Sachwissen diskutiert werden muss.

Christina Beck

Matthias Sutter  
*Der menschliche Faktor oder worauf es im Berufsleben ankommt*  
288 Seiten, Carl Hanser Verlag  
29,99 Euro



76

## EIN KEKS VOM ERTLATOR

Es muss nicht immer Liebe auf den ersten Blick sein. Gerhard Ertl schreibt über den Beginn seines Physikstudiums: „Gar nichts konnte ich dem Fach ‚Physikalische Chemie‘ abgewinnen.“ Trotzdem hat er sich später diesem Gebiet verschrieben und im Jahr 2007 den Nobelpreis erhalten. Ertl räumt auch freimütig ein, dass er sein Studium nicht mit voller Intensität betrieb, weil er der Musik so viel Zeit widmete: Als Pianist absolvierte er mit seiner Band bis zu vier Auftritte in der Woche. Solche süffisanten Randnotizen machen Ertls Autobiografie besonders unterhaltsam. Und in der Beschreibung seiner wissen-

schaftlichen Arbeit wird deutlich: Der Weg zum Nobelpreis hat Ertl viel Vergnügen bereitet, aber es brauchte Einfallskraft, Hartnäckigkeit, eine Portion Akribie – und Talent. Welche naturwissenschaftliche Begabung der Forscher mitbrachte, zeigt die Facharbeit *Das physikalische Weltbild im Lichte der Relativitäts- und Quantentheorie*. Ertl schrieb sie als 16-Jähriger und bemerkt dazu, dass er darin auch heute keine grundsätzlichen Fehler finde und einige der aufgeworfenen Fragen immer noch nicht befriedigend beantwortet seien. Die Arbeit ist als Faksimile abgedruckt und ein Beispiel für die aufwen-

dige und ansprechende Gestaltung des Buchs. Die Erklärung für den abgebildeten „Ertlator“ – ein Geschenk zum 60. Geburtstag – muss man allerdings auf der Webseite seines Instituts suchen: Die Apparatur belohnt das Erreichen eines chaotischen Zustands in einem dynamischen Prozess mit einem Keks.

Peter Hergersberg

Gerhard Ertl  
*Mein Leben mit der Wissenschaft*  
172 Seiten, GNT-Verlag  
34,80 Euro



# NEU ERSCHIENEN

## SO VIEL LEBEN

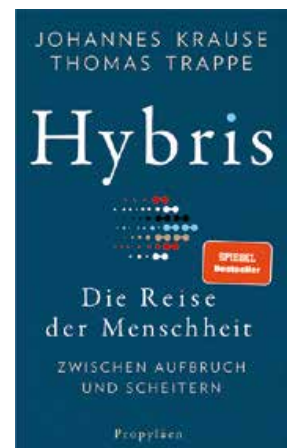


Das Monster mit weit aufgerissenem Maul ist bereit, jeden Moment zuzuschnappen! Im ersten Augenblick hat man instinktiv Hemmungen, das Buch in die Hand zu nehmen – aber keine Sorge, es ist ja nur ein Titelbild, noch dazu das Bild eines wenige Zentimeter kleinen Vielborster-Wurms namens *Lepidonotopodium piscisae*, der in 3000 Metern Tiefe im östlichen Pazifik lebt. Außerdem wäre es schade, dieses Buch deswegen zu verschmähen, denn die Lektüre ist ausgesprochen lohnenswert. Unter dem Titel *Leben in den Eismonden?* beschreibt Mario Markus, ehemaliger Arbeitsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie, die Möglichkeiten außerirdischen Lebens. Was wie Science-Fiction klingt, ist im Fach Astrobiologie wissenschaftliche Realität. Und so begleitet uns der Autor nach einem Streifzug zu irdischen Organismen, die unter extremen Bedingungen existieren, hinaus ins Sonnensystem. Dort treffen wir nicht nur auf die üblichen Verdächtigen wie den Mars, der einst Leben beherbergt haben könnte, sondern auch auf die Eismonde der Gasriesen Jupiter und Saturn. Tatsächlich gibt es auf einigen dieser Trabanten wie Europa oder Enceladus unter dem Eis ausgedehnte Ozeane aus Salzwasser – und es besteht die Möglichkeit, dass sich darin wie auch immer geartete Lebensformen entwickelt haben. All das schildert Markus mit großem Sachverstand. Ein Blick zu den Planeten fremder Sterne und die Frage nach intelligenten Aliens beschließen das anspruchsvolle Buch mit seinen zahlreichen (aber leider nur schwarz-weißen) Abbildungen.

*Helmut Hornung*

---

Mario Markus  
*Leben in den Eismonden?*  
128 Seiten, Verlag Dr. Friedrich Pfeil  
24,80 Euro



77

## ZWISCHEN AUFBRUCH UND SCHEITERN

Die menschliche Hybris ist ein wiederkehrendes Thema der griechischen Mythologie: Im Glauben, den Göttern ebenbürtig zu sein, schaden Menschen sich und anderen und ziehen den Zorn und die Strafe der Götter auf sich. Dieses Motiv der Selbstüberschätzung ist der rote Faden im neuen Buch des Max-Planck-Direktors Johannes Krause und des Journalisten Thomas Trappe. Ähnlich wie in ihrem Bestseller *Die Reise unserer Gene* beschreiben die beiden Autoren, wie der Mensch die Erde besiedelte, und warten dabei mit vielen neuen Erkenntnissen und Aspekten auf. Anschaulich und packend legt das Autorenduo dar, welche Hürden unsere Vorfahren bei der Besiedelung der Welt überwinden und welche Rückschläge sie einstecken mussten. So brauchte Homo sapiens – anders als oft dargestellt – mehrere Anläufe, bis er in Europa Fuß fassen konnte. Krause und Trappe zeigen

aber auch die Kollateralschäden des menschlichen Expansionsdrangs. So haben Menschen wohl schon in ihrer Frühgeschichte Großtierarten komplett ausgerottet. Nur in Afrika, der Wiege der Menschheit, überlebten große Tiere wie Elefanten oder Nashörner, weil sie gleichzeitig mit der menschlichen Evolution eine natürliche Scheu gegenüber Menschen entwickelten. Am Ende steht die Frage, welche Zukunft Homo hybris auf diesem Planeten hat. Die Antwort der Autoren ist vorsichtig optimistisch: „Die Rettung der menschlichen Zivilisation wird (...) eine kulturelle Leistung sein.“

*Mechthild Zimmermann*

---

Johannes Krause, Thomas Trappe  
*Hybris*  
352 Seiten, Propyläen Verlag  
24,00 Euro



# FÜNF FRAGEN

## ZU NEUEN EU-REGELN FÜR INTERNETKONZERNE

AN HEIKO RICHTER

**Die Gremien der Europäischen Union haben sich Ende März vorläufig auf den Digital Markets Act, kurz DMA, geeinigt. Ziel ist, künftig die Marktmacht von Techgiganten wie Google, Apple, Facebook/Meta, Amazon oder Microsoft zu begrenzen und den Wettbewerb im europäischen Markt zu schützen. Herr Richter, wieso sind die bisherigen Regeln nicht ausreichend?**

HEIKO RICHTER Bislang haben wir vor allem im Kartellrecht nur Ex-post-Regeln: Sie greifen erst, nachdem ein Verstoß vorliegt oder vermutet wird. Das hat zur Folge, dass es sehr lange dauert, bis es zu einer Sanktionierung des Verhaltens kommt. Zum Teil liegen die in Streit stehenden Handlungen bis zu zehn Jahre zurück, und die Verfahren sind immer noch nicht abgeschlossen. Das Kartellrecht ist hier also im Ergebnis zu langsam.

### Was soll sich ändern?

Die Grundidee des DMA ist die Regulierung vorab. Er soll besonders großen Plattformdiensten Verhaltenspflichten auferlegen. Nach ersten Informationen sollen diejenigen Unternehmen als „Gatekeeper“ gelten, die mehr als 7,5 Milliarden Euro Jahresumsatz in der EU erwirtschaften oder einen Marktwert von über 75 Milliarden Euro aufweisen. Der Dienst selbst muss mehr als 45 Millionen Endnutzer pro Monat sowie 10 000 gewerbliche Nutzer in der EU pro Jahr zählen.

### Welche Pflichten haben Gatekeeper künftig?

Besonders relevant im Pflichtenkatalog sind Verbote, etwa die Registrierung bei einem Dienst an die Registrierung bei einem anderen zu koppeln oder es gewerblichen Nutzern zu untersagen, ihre Produkte und Leistungen auf Plattformen Dritter zu anderen Preisen und Bedingungen anzubieten. Außerdem müssen Betriebssysteme wie Googles Android oder Apples iOS zulassen, dass auf Smartphones andere AppStores als ihre eigenen installiert werden. Selbstbevorzugung wird explizit verboten.

### Schafft es die Verordnung, die digitalen Märkte offener und fairer zu machen?

Entscheidend ist, wie die Regeln der Verordnung konkret angewendet und durchgesetzt werden. So muss sich erst zeigen, ob das festgelegte Verfahren gut funktioniert – etwa der vorgesehene Dialog zwischen Kommission und Gatekeepern über die Regulierungsmaßnahmen. Eine andere offene Frage ist, wie effektiv die Zusammenarbeit zwischen den nationalen Behörden und der EU-Kommission abläuft und welche Rolle nationale Gerichte bei der Durchsetzung der Regeln spielen. Die EU-Kommission soll zudem eine ganz zentrale Rolle bekommen. Sie wird verschiedenste Maßnahmen gegenüber den Gatekeepern anordnen können und gleichzeitig deren Einhaltung überwachen. Dazu muss die Kommission zahlreiche zusätzliche Stellen mit spezifischer

Fachkompetenz schaffen. So übernimmt sie eine völlig neue Rolle als Regulierungsbehörde. Man darf gespannt sein, ob es ihr letztlich gelingt, den großen Techunternehmen auf Augenhöhe Paroli zu bieten.

### Die neue Verordnung wird wohl 2023 in Kraft treten. Lassen sich denn alle Neuerungen unmittelbar umsetzen?

Das wird sich zeigen. Problematisch ist, dass viele technische Fragen nicht gelöst, sondern nur verschoben werden. Das Feintuning erfolgt über sogenannte delegierte Rechtsakte, die von der Kommission erst noch erlassen werden müssen. In der Praxis dauert das oft Jahre. Ein Beispiel: Bislang war die Deutsche Bahn nicht verpflichtet, anderen Diensten wie etwa Google Maps Echtzeitangaben ihrer Züge zur Verfügung zu stellen. Die EU-Richtlinie, die das regelt, ist zwar seit 2010 in Kraft, aber erst 2017 klärte die Kommission in einem delegierten Rechtsakt die Details. Und erst 2021 erhielten die Regelungen Eingang in das deutsche Personenbeförderungsgesetz. Nach wie vor ist jedoch unklar, ob die Deutsche Bahn Echtzeitangaben zur Verfügung stellen muss.

*Interview: Michaela Hutterer*

Dr. Heiko Richter ist wissenschaftlicher Referent für Digitalisierung und Wettbewerbsrecht am Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb.

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

**Niederlande**

- Nimwegen

**Italien**

- Rom
- Florenz

**USA**

- Jupiter, Florida

**Brasilien**

- Manaus

**Luxemburg**

- Luxemburg



IMPRESSUM

Max Planck Forschung 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)  
Helmut Hornung (Astronomie; -1404)

**Redaktion**

Dr. Elke Maier (Biologie; -1064)  
Dr. Harald Rösch (Biologie, Medizin; -1756)  
Mechthild Zimmermann (Kultur, Gesellschaft; -1720)

**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

Max Planck Forschung 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 allgemeinverständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (*Max Planck Research*) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr. Die Auflage dieser Ausgabe beträgt 80000 Exemplare (*Max Planck Research*: 10000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in *Max Planck Forschung* 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 6700 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2020 umfasste insgesamt 1,92 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.

Max Planck Forschung 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

