

Ausgabe 04 | 2023

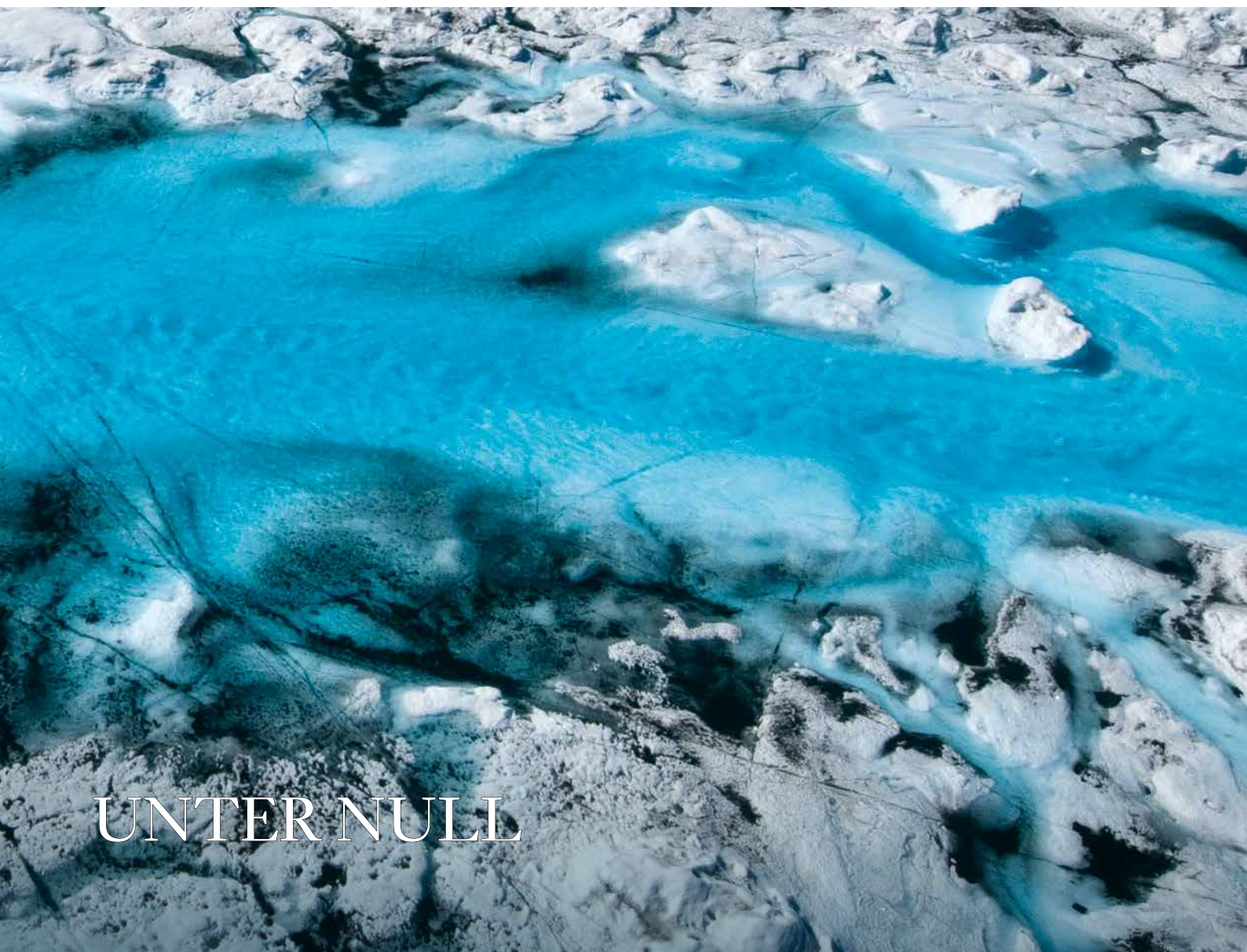
# MAX PLANCK

*Forschung*

**75**<sup>JAHRE</sup> MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT  
Patente Lösungen

SYNTHETISCHE BIOLOGIE  
E-Antrieb fürs Leben

RECHTSWISSENSCHAFT  
Streitsache Natur



UNTER NULL



FOTO: IAN JOUGHIN (DISTRIBUTED VIA IMAGGO.EGU.EU)

**G**letscherabfluss:  
Über solche Kanäle fließt  
das Schmelzwasser des  
Grönländischen Eisschildes  
ab. Der Klimawandel  
mit seinen steigenden  
Temperaturen verändert  
auch diese Landschaft,  
die von der Kälte geformt  
wurde.

# EDITORIAL

---

Liebe Leserin, lieber Leser

Außergewöhnliche Kälte ist zumindest in Europa nur noch selten ein Problem – und wenn man so will, ist genau das ein Problem. Infolge des Klimawandels müssen wir uns eher wegen ungewöhnlich hoher Temperaturen Sorgen machen. Hitze kostet Tausende Menschenleben und verschärft in vielen Regionen die Trockenheit. Und ungewöhnlich milde Temperaturen führen dazu, dass die Eisschilde Grönlands und der Antarktis schmelzen. Wie das Klima und die Eisschilde einander beeinflussen, schildern wir in unserem Fokus zu Kälte.

Fest steht: Die tauenden Eiskappen lassen den Meeresspiegel steigen. Dies bedroht Inselstaaten und Küstenstädte. Dank der Einigung der Weltklimakonferenz in Dubai auf eine „Transformation weg von fossilen Brennstoffen“ können sie weiter hoffen, dem Untergang zu entgehen. Das UN-Klimasekretariat präsentiert die Vereinbarung als Anfang vom Ende der fossilen Brennstoffe. Allerdings ist die Einigung völkerrechtlich nicht bindend und lässt den Staaten viel Spielraum, den Übergang zu gestalten. Trotzdem werten Max-Planck-Forschende, die die Klimakonferenz beobachtet haben, die Ergebnisse vorsichtig positiv ([www.mpg.de/21271429](http://www.mpg.de/21271429)).

3

So könnten sich die schlimmsten Auswüchse der Erderwärmung noch abwenden und die Temperaturen auch im Anthropozän einigermaßen stabil halten lassen. Für die Menschheit ist das wichtig, denn erst im Klima des Holozäns ohne extreme Ausschläge war die Entwicklung der menschlichen Zivilisation möglich. Auch wenn heute zunehmend Hitze, Dürre und Überschwemmungen die Bevölkerung in vielen Regionen der Welt zur Flucht zwingen, zeigt ein Blick in die letzte Kaltzeit, wie klimatisch unwirtliche Bedingungen den Menschen zusetzen. Eis und Kälte haben damals weite Teile Europas unbewohnbar gemacht, wie wir ebenfalls in unserem Fokus darstellen.

In eigener Sache können wir noch eine gute Nachricht vermelden: Die Infografiken, die wir mit der Grafikagentur GCO gestalten, haben den Creative Communication Award 2023 gewonnen ([www.c2award.com/winners/c2a/2023/5483/](http://www.c2award.com/winners/c2a/2023/5483/)).

Wir hoffen, auch die Infografik dieser Ausgabe zur Saisonalität von Viruserkrankungen liefert hilfreiche Informationen – und Sie finden ein gemütliches Plätzchen für die Lektüre unseres Magazins.

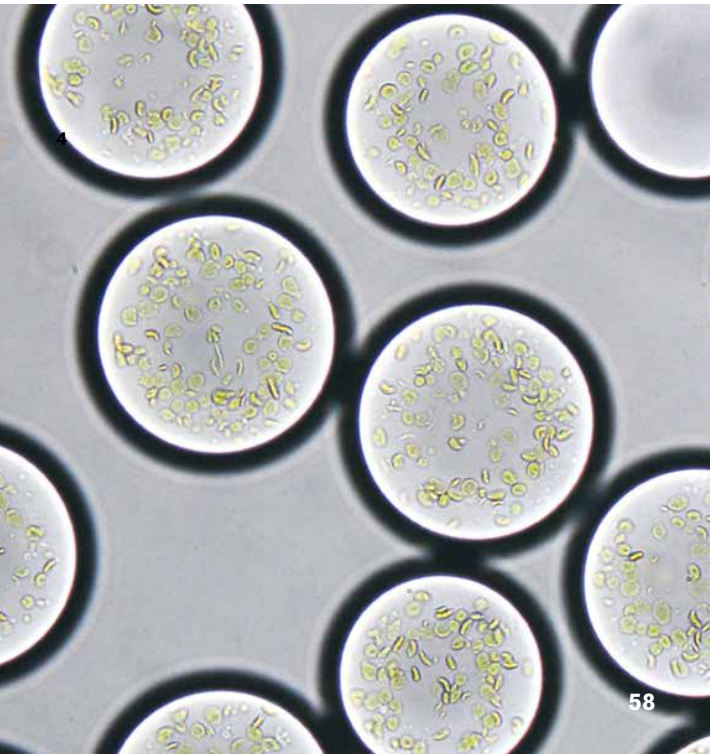
Ihr Redaktionsteam



38



44



58



64

BILDER: NASA, ESA, CSA / SCIENCE LEADS AND IMAGE PROCESSING: M. MCCAUGHREAN, S. PEARSON, CC-BY-SA 3.0 IGO (LINKS OBEN), CHRISTOPH SEELBACH FÜR MPG (RECHTS OBEN), TOBIAS ERB / MPI FÜR TERRESTRIISCHE MIKROBIOLOGIE (LINKS UNTEN), FAUSTO PODAVINI (RECHTS UNTEN)

**38 | GASREICH**

Aus der Materie interstellarer Wolken entstehen neue Sterne und Planeten.

**44 | FACETTENREICH**

Silke Britzen entwickelte schon früh eine Leidenschaft für Astronomie und Malerei.

**58 | EINFALLSREICH**

Mithilfe künstlicher Chloroplasten lassen sich Zellen effizient mit Energie versorgen.

**64 | KONFLIKTREICH**

Projekte wie der Gibe-III-Staudamm in Äthiopien rauben Menschen die Lebensgrundlage.

## 03 | EDITORIAL

## 06 | ORTE DER FORSCHUNG

Eine versunkene Welt



## 08 | NOBELPREIS 2023

Ferenc Krausz

## 10 | KURZ NOTIERT

## 18 | ZUR SACHE

Recht an der Grenze

Ulrich Becker und Constantin Hruschka erklären, wie sich EU-Grenzverfahren effektiv und rechtssicher gestalten lassen.

## 24 | INFOGRAFIK

Hochsaison für Viren

## IM FOKUS

Unter null

## 26 | EISIGE ZEITEN

Kälte prägte jahrtausendlang das Leben der Menschen in Europa. Die Migrationsrouten infolge extremer Klimaschwankungen lassen sich noch heute in unserem genetischen Erbe ablesen.

## 32 | Die große Schmelze

Der Klimawandel lässt die polaren Eisschilde schrumpfen und den Meeresspiegel steigen. Rückkopplungen zwischen dem Klimasystem und der Eisbedeckung bestimmen, wie stark die Veränderungen sind.

## 38 | Coldfinger

Wie entstehen in Sonnensystemen Bedingungen, unter denen sich Leben entwickeln kann? Die Chemie eis-kalter Molekülwolken liefert Hinweise.

## 44 | BESUCH BEI

Silke Britzen

## 50 | ZWEITER BLICK

## 52 | 75 JAHRE MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Patente Lösungen

Max-Planck-Innovation hat zum Ziel, Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung in die Anwendung zu bringen.

## WISSEN AUS

## 58 | E-Antrieb fürs Leben

Stoffwechselwege wie die Fotosynthese könnten helfen, Rohstoffe künftig schonender und effizienter zu produzieren.

## 64 | Streitsache Natur

Bedroht der Fortschritt die Kultur und den Lebensraum von Menschen, sind Umweltrechte ein Ausweg – sofern sie auch durchgesetzt werden.

## 70 | POST AUS...

Perth, Australien

## 72 | NEU ERSCHIENEN

## 74 | FÜNF FRAGEN

zu Kippunkten und Klimaangst

## 75 | IMPRESSUM

## TECHMAX

Liveschaltung in den Körper – neue Einblicke mit der Echtzeit-MRT



*EINE VERSUNKENE  
WELT*

6

FOTO: OSCAR SOLIS TORRES



# ORTE DER FORSCHUNG

---



Die Menschheit stammt aus Afrika. Von dort aus hat der *Homo sapiens* die gesamte Erde besiedelt. Über Europa und Asien bis nach Australien und zu den Inseln des Pazifik. Die letzte große Landmasse, die der moderne Mensch bei seiner beispiellosen Ausbreitung in Besitz nahm, waren die beiden Teile Amerikas. Vor etwa 20 000 bis 30 000 Jahren, im späten Pleistozän, wanderten die Menschen über die zu jener Zeit im Bereich der Beringstraße bestehende eisfreie Landbrücke von Sibirien nach Alaska und breiteten sich von dort nach Süden aus.

7

Damals lebten auf dem amerikanischen Kontinent zahlreiche große Säugetiere, darunter Elefanten, Nashörner und Pferde, aber auch Riesenfaultiere – mehr als sechs Meter lang und mehrere Tonnen schwer. Zusammen werden sie als nordamerikanische Megafauna bezeichnet. Doch am Ende der letzten Kaltzeit, vor ungefähr 11 500 Jahren, starben die meisten dieser Tiere aus, während gleichzeitig die Menschen Nord- und Südamerika eroberten. Handelt es sich hier um bloße Koinzidenz, oder sind diese Ereignisse miteinander verknüpft? Sind die Menschen mitverantwortlich für das Aussterben der Megafauna? Oder, im Fall der Faultiere, vielleicht sogar die Ursache? Zum Beispiel, weil sie Jagd machten auf die großen, sich sehr langsam bewegenden Tiere?

Diesen Fragen geht Óscar Solís Torres vom Max-Planck-Institut für Geoanthropologie nach. Er untersucht tropische Höhlen auf der mexikanischen Halbinsel Yucatán, wo einige der frühesten bisher bekannten Spuren menschlicher Anwesenheit auf dem amerikanischen Kontinent gefunden wurden. Solís Torres sucht nach Beweisen für menschliche Präsenz und nach Überresten der Megafauna – hier im Sac-Actun-Höhlensystem an der nordöstlichen Küste von Yucatán. Die Herausforderung: Die Tropfsteinhöhlen des Sistema Sac Actun liegen seit etwa 9000 Jahren unter Wasser. Mit seinen bisher bekannten 347 Kilometern ist Sac Actun eines der größten Unterwasserhöhlensysteme der Erde – und eine der wichtigsten Stätten der Unterwasserarchäologie.



FOTO: PICTURE ALLIANCE / ABACA | NIVIERE DAVID/ABACA.PRESS.COM, GRAFIK: GCO NACH MPG



# NOBELPREIS FÜR PHYSIK

FERENC  
KRAUSZ



In Stockholm empfängt Ferenc Krausz am 10. Dezember 2023 die Nobelmedaille aus der Hand von König Carl Gustaf.

Ein Nobelpreis ist kein Sonntagsspaziergang. Ferenc Krausz war die Konzentration bei der Preisverleihung am 10. Dezember anzusehen: Der Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und Professor an der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) wurde gemeinsam mit Pierre Agostini von der Ohio State University (USA) und Anne L’Huillier von der Universität Lund (Schweden) für die Begründung der Attosekundenphysik mit dem Nobelpreis für Physik geehrt. Während der Einführung in das Thema, ehe der schwedische König Carl Gustaf die Medaillen überreichte, stand eine tiefe Falte auf Krausz’ Stirn. Die Anspannung mag nicht nur an der Größe des Moments gelegen haben. Ferenc Krausz und die anderen Ausgezeichneten hatten in der Nobelwoche zuvor schon ein strammes Programm absolvieren müssen: Pressetermine, Proben, Empfänge, öffentliche Präsentationen – alles eng getaktet und abends noch ein Bankett.

Und dabei haben Laureaten schon eine lange Strecke und manche Hindernisse hinter sich, ehe das Nobelkomitee überhaupt auf sie aufmerksam wird. Aber auch für Ferenc Krausz war es alle Mühe wert: „Es ist ein sehr schönes Gefühl zu sehen, dass es sich lohnt, sich nach Rückschlägen nicht entmutigen zu lassen, sondern den Weg unbeirrt weiterzugehen“, sagte Ferenc Krausz, kurz nachdem das Nobelkomitee ihn verständigt hatte. „Und das ist es auch, was ich an die nächsten Generationen weitergeben möchte.“

Der Physiker, der aus Ungarn stammt, begann den Weg in die Attosekundenphysik in den 1990er-Jahren. Anfang der 2000er-Jahre schaffte es sein Team dann erstmals, Lichtpulse im Attosekundenbereich zu erzeugen – eine Attosekunde ist ein Milliardstel einer Milliardstelsekunde. Zum Vergleich: In eine Sekunde passen so viele Attosekunden wie Sekunden in die Zeit seit dem Urknall. Die Grundlage dafür legten Ferenc Krausz und sein Landsmann Robert Szipöcs mit der Entwicklung von Spiegeln, mit denen sich extrem intensive Laserpulse aus wenigen Schwingungen einer Lichtwelle erzeugen lassen. Im Jahr 2002 gelang es Krausz und Theodor Hänsch, der auch Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und Professor an der LMU ist, mit Hänschs ebenfalls

nobelpreisgekrönter Frequenzkammtechnik, die genaue Form einer Lichtwelle zu kontrollieren. Solche Lichtblitze, die einige Femtosekunden dauerten, schoss das Team von Krausz auf Edelgasatome. Die starken elektromagnetischen Felder der Pulse zerrten Elektronen aus den Atomen. Sobald diese die Elektronen wieder einfingen, gaben sie Blitze von wenigen 100 Attosekunden ab. Inzwischen dauern die kürzesten Lichtpulse deutlich weniger als 100 Attosekunden.

Mit den extrem kurzen Laserblitzen können die Forschenden um Ferenc Krausz Elektronen filmen, etwa beim quantenmechanischen Prozess des Tunnelns. Dabei durchdringen die Ladungsträger eine Energiebarriere, die sie nach den Gesetzen der klassischen Physik nicht überwinden könnten. Das Team hat zudem das pulsierende positiv geladene Loch abglichtet, das ein Elektron in einem Edelgasatom hinterlässt, nachdem es per Lichtblitz herausgeschlagen wurde. Die Forschenden verfolgen inzwischen auch Elektronen in Metallen. So haben sie etwa beobachtet, wie schnell Elektronen einzelne Atomlagen durchqueren. Die Attosekundenphysik ermöglicht es nicht zuletzt, die Elektronen zu kontrollieren. Das könnte auch dazu beitragen, schnellere elektronische Bauteile zu entwickeln.



# DEUTSCH-UKRAINISCHER EXZELLENZKERN STARTET IN HALLE

Um die ukrainische Wissenschaft zu stärken, wird das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in den kommenden vier Jahren jeweils mit 2,5 Millionen Euro vier Exzellenzkerne fördern. Diese sind auch ein wichtiger Beitrag zum Wiederaufbau des Landes. Einer dieser Exzellenz-

kerne – genannt Plasma-Spin Energy – entsteht in einer Kooperation zwischen dem Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle und der W.-N.-Karasin-Universität Charkiw. Dieser Exzellenzkern soll perspektivisch in Charkiw angesiedelt sein. Die Forschenden wollen mit

Plasmatechniken Bauteile für die Spintronik produzieren. Diese nutzt nicht – wie es die herkömmliche Elektronik tut – die Ladung von Elektronen, sondern deren Spin und soll leistungsfähigere elektronische Geräte ermöglichen.

[www.mpg.de/21086560](http://www.mpg.de/21086560)

## AUSGEZEICHNET ★



FOTO: CHRIS KETTNER

**TOBIAS ERB**

Der Direktor am Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie in Marburg erhält einen Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis, der mit

2,5 Millionen Euro dotiert wird.

Er erhält die Auszeichnung für seine Forschung an Stoffwechselwegen von Mikroorganismen, vor allem solchen, die Fotosynthese betreiben. Erb untersucht mikrobielle Enzyme, verändert ihre Eigenschaften und baut mithilfe der synthetischen Biologie unter anderem Stoffwechselwege zusammen, die CO<sub>2</sub> effizienter als ihre natürlichen Vorbilder umsetzen. Damit eröffnen sich neue Wege, um aus CO<sub>2</sub> mithilfe von Licht nachhaltige Rohstoffe zu produzieren.



FOTO: MPI FÜR HIRNFORSCHUNG

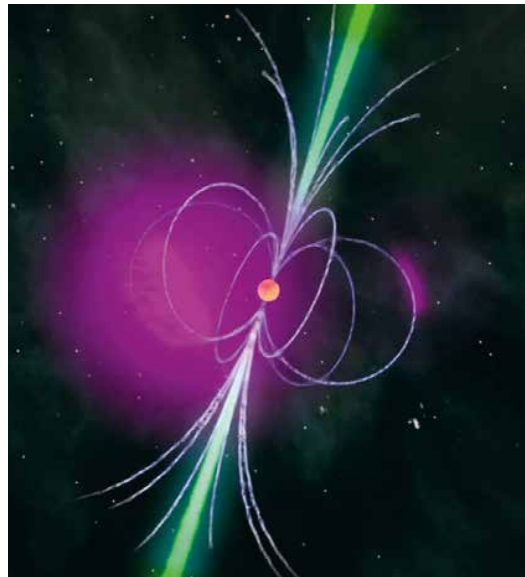
**MORITZ HELMSTAEDTER**

Ebenfalls ein Leibniz-Preis wird Moritz Helmstaedter, Direktor am Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt, zuer-

kannt. Er wird für seine Pionierarbeiten in den Neurowissenschaften geehrt. Helmstaedter hat Instrumente und Techniken entwickelt, die Einblicke in die dicht gepackten neuronalen Netzwerke des Gehirns erlauben. Er ist damit einer der Begründer der Konnektomik, die Tausende von Neuronen und deren synaptische Verschaltungen rekonstruiert. Diese Forschung verbessert grundlegend das Verständnis, wie die Schaltkreise im Gehirn von Säugtieren organisiert sind und funktionieren.

10

BILD: NASA/FERMI/CRUZ DEWILDE



**Kosmischer Leuchtturm:** Die Illustration zeigt einen Neutronenstern, der über seinen Magnetpolen Radiowellen (grün) abstrahlt. Da ein solcher Radiopulsar rotiert, scheint er, von der Erde aus gesehen, periodisch aufzuleuchten.

## STERNENSUCHE VOM SOFA AUS

Einstein@Home bündelt die ansonsten ungenutzte Rechenleistung auf den PCs von mehr als 15000 Freiwilligen und ist damit eines der weltweit größten Citizen-Science-Projekte dieser Art. Seit 2009 hat Einstein@Home mehr als 150000 Beobachtungen des Arecibo-Radioteleskops ausgewertet und die gigantische Zahl von 60 Milliarden Pulsarkandidaten ermittelt, die sich in den Daten verbergen könnten. Mithilfe eines neuen Algorithmus haben Forschende des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik diese Zahl nun reduziert

und eine Kartei mit 50000 besonders vielversprechenden Kandidaten für die schnell rotierenden Neutronensterne erstellt. Für jeden dieser möglichen neuen Pulsare erzeugte das Forschungsteam eine Reihe von Grafiken der Messdaten. Im Rahmen des neuen Bürgerwissenschaftsprojekts „Pulsar Seekers“, das über die Plattform Zooniverse betrieben wird, können Freiwillige jetzt die grafischen Darstellungen der Einstein@Home-Ergebnisse klassifizieren, um darin die tatsächlichen Pulsare aufzuspüren.

[www.mpg.de/21026221](http://www.mpg.de/21026221)

# KURZ NOTIERT

FOTO: YONI KELBERMAN / MPG



Patrick Cramer in der Holocaust-Gedenkstätte Yad Vashem in Jerusalem, im Hintergrund weitere Mitglieder der Max-Planck-Delegation.

## MAX-PLANCK-DELEGATION IN ISRAEL

Es war ein Besuch in schweren Zeiten. Dabei hätte es in diesem Jahr eigentlich einen Grund zum Feiern gegeben. Denn das Minerva-Stipendienprogramm, das den israelisch-deutschen Austausch in der Wissenschaft fördert, feiert sein 50-jähriges Bestehen. Doch wegen der barbarischen Terrorattacke der Hamas und des grauenvollen Krieges in Gaza wurde die geplante Veranstaltung abgesagt. Trotzdem reiste Ende November eine kleine Delegation der Max-Planck-Gesellschaft und der Minerva-Stiftung unter der Leitung von Präsident Patrick Cramer nach Israel, um den langjährigen Kolleginnen und Kollegen an den israelischen Universitäten und am Weizmann Institute of Science ihre Verbundenheit auszudrücken. Es war der erste und bisher einzige Besuch einer internationalen Forschungsorganisation in Israel seit dem 7. Ok-

tober. Im Van Leer Jerusalem Institute traf die Delegation die Präsidenten und Vizepräsidenten der israelischen Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie die Direktoren und Direktorinnen der Minerva-Zentren. Mitgebracht hat sie Unterstützungsangebote für die Wissenschaft, denn Forschung ist in Israel gerade kaum noch möglich. Die Max-Planck-Gesellschaft und die Minerva-Stiftung unterstützen israelische Forschende daher dabei, ihre Projekte an Max-Planck-Instituten in Deutschland fortzuführen oder Konferenzen, welche in Tel Aviv, Haifa oder Jerusalem nicht mehr möglich sind, hier auszurichten. Die Delegation besuchte auch die Holocaust-Gedenkstätte Yad Vashem und legte dort einen Kranz für die verfolgten Wissenschaftler der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft nieder.

## ERFOLGREICH IN EUROPA

Sie wollen eine neue mathematische Sprache entwickeln, die Regenerationsfähigkeiten des Axolotl-Gehirns erforschen, sind auf der Suche nach bewohnbaren Welten außerhalb unseres Sonnensystems und arbeiten daran, Düfte über das Internet zu übertragen. In der Ausschreibungsrunde für die ERC Synergy Grants 2023 wurden aus 396 Anträgen europaweit 37 Projekte zur Förderung ausgewählt. Vier Grants und damit rund 40 Millionen Euro gehen dabei an Forschungsteams aus der Max-Planck-Gesellschaft. Und auch bei den mit jeweils rund zwei Millionen Euro dotierten Consolidator Grants waren vier Max-Planck-Projekte erfolgreich. Sie gehen an Forschende, die ihre Promotion erst vor wenigen Jahren abgeschlossen haben und einer vielversprechenden wissenschaftlichen Karriere entgegensehen. Die Forschungsthemen reichen von Riesenviren, Origami-DNA für die Optimierung lebenswichtiger Enzymfunktionen über Mikroben als Biokraftstoffquellen bis hin zur Rekonstruktion von Nachbarschaftsstrukturen in prähistorischer Zeit mithilfe alter DNA.

[www.mpg.de/21011005](http://www.mpg.de/21011005)  
[www.mpg.de/21141997](http://www.mpg.de/21141997)

Mausherzen rund einen Monat nach einem Infarkt: Bei Mäusen mit funktionierendem Cpt1b-Gen ist die Herzkammer erweitert und das Muskelgewebe geschädigt (links). Die Herzen von Tieren ohne funktionstüchtiges Cpt1b-Gen haben sich dagegen nach dem Infarkt vollständig regeneriert (rechts).

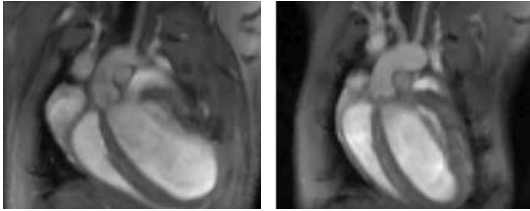


BILD: MPI FÜR HERZ- UND LUNGENFORSCHUNG

## EIN HERZ LÄSST SICH REPARIEREN

Weil sich die Herzmuskelzellen nach der Geburt nicht mehr teilen können, verliert das menschliche Herz nahezu vollständig seine Fähigkeit, Schäden zu reparieren. Deshalb schädigt ein Herzinfarkt den Herzmuskel bei Erwachsenen meist dauerhaft. Wenn die Zellen die Teilungsfähigkeit verlieren, ändert sich auch ihr Energiestoffwechsel: Anstatt aus Zuckern beziehen sie ihre Energie dann weitestgehend aus Fetten. Forschende des Max-Planck-Instituts für Herz- und Lungenforschung haben nun erstmals das Herz ausgewachsener Mäuse nach einem Infarkt wiederhergestellt. Dabei konzentrierten sich die Forschenden auf

ein für die Verbrennung von Fettsäuren wesentliches Gen namens Cpt1b. Mäuse, bei denen Cpt1b in Herzmuskelzellen ausgeschaltet wurde, weisen einige Wochen nach einem Infarkt fast keine der sonst üblichen Narben im Herzmuskel mehr auf. Das Herz dieser Tiere kann beinahe genauso stark schlagen wie vor dem Infarkt. Die Inaktivierung des Gens hat zur Folge, dass die Herzmuskelzellen wieder in einen unreifen Zustand zurückversetzt werden und sich so regenerieren können. Hemmstoffe, welche die Wirkung von Cpt1b blockieren, könnten also eine Option für neue Therapien sein.

[www.mpg.de/2097995](http://www.mpg.de/2097995)

## MENSCH UND FLEDERMAUS

12 Fledermäuse gelten gemeinhin als Träger von Viren, die auf den Menschen übertragbar sind. Ein Forschungsteam des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie hat nun Studien ausgewertet, die Viren von über 160 afrikanischen Fledermausarten untersucht haben. Abgesehen vom Nilflughund, der Träger des Marburg- und Sosuga-Virus sein kann, haben sie keine Belege dafür gefunden, dass afrikanische Fledermausarten für den Menschen gefährliche Viren beherbergen. Eine Übertragung von Viren von Fledermäusen auf Menschen ist in Afrika zudem nur in zwei Fällen belegt. Doch trotz der gegenteiligen Forschungsergebnisse gelten Fledermäuse als Krankheitsüberträger. Dies kann fatale Folgen für die Tiere haben, denn es befördert ihre ohnehin schon zunehmende Verfolgung durch den Menschen. Zudem hat der Rückgang der Fledermäuse in Afrika auch dramatische Auswirkungen auf die Natur, denn die Tiere verbreiten die Samen von Bäumen und helfen so mit, zuvor abgeholzte Regionen wieder aufzuforsten.

[www.mpg.de/21137145](http://www.mpg.de/21137145)

Illustration eines Exoplaneten, der um einen sonnenähnlichen Stern kreist.

## DAS VERSTECKSPIEL DER EXOMONDE

So wie man davon ausgehen kann, dass Planeten die meisten Sterne unserer Milchstraße umkreisen, sollten auch Monde um diese Exoplaneten keine Seltenheit sein. Ihr Nachweis ist jedoch noch einmal deutlich schwieriger als die Suche nach Exoplaneten und gleicht einem Versteckspiel. Sowohl Planeten als auch ihre Monde lassen sich über die Transitmethode aufspüren. Zieht ein solcher Himmelskörper, von der Erde aus gesehen, vor seinem Stern oder Planeten vorbei, verdunkelt er diesen ein bisschen. Bei einem Exomond, der den Planeten begleitet, geht der Effekt aber leicht im Datenrau-

schen unter. Unterschiedliche Analysen bestätigen die Existenz von Monden daher bislang mal und mal nicht. Überhaupt wurden nur bei zwei der mehr als 5300 bekannten Exoplaneten, nämlich Kepler-1625b und Kepler-1708b, vermeintliche Hinweise auf Monde gefunden. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung und des Sonneberg-Observatoriums hat die Daten nun allerdings noch einmal mit einem auf Exomonde getrimmten Suchalgorithmus analysiert. Fündig geworden sind sie dabei nicht, aber das Versteckspiel geht weiter.

[www.mpg.de/21216050](http://www.mpg.de/21216050)



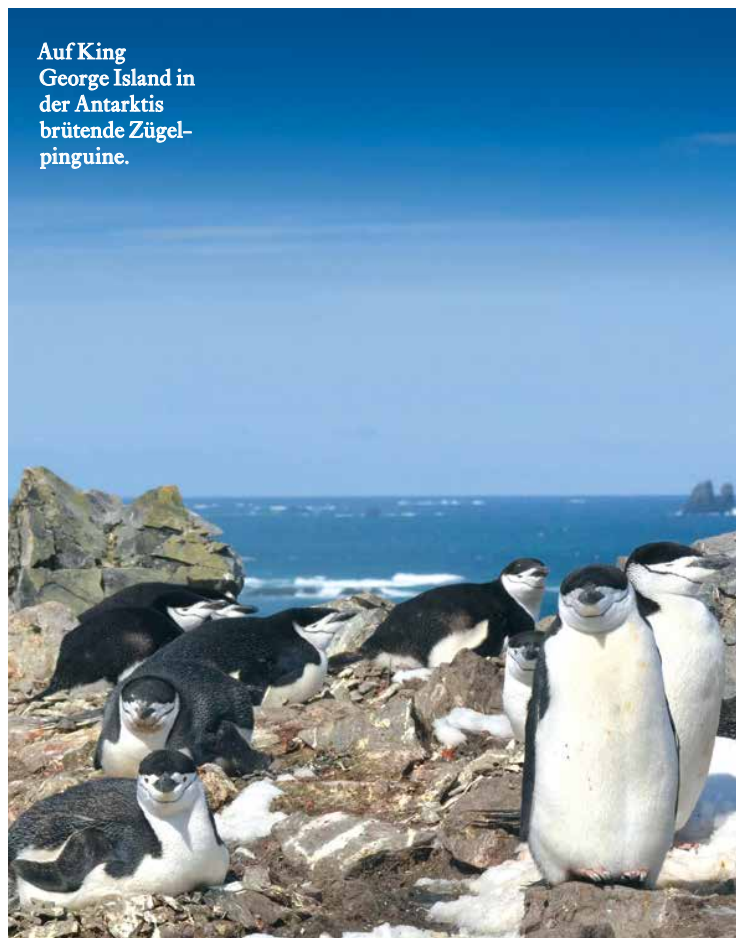
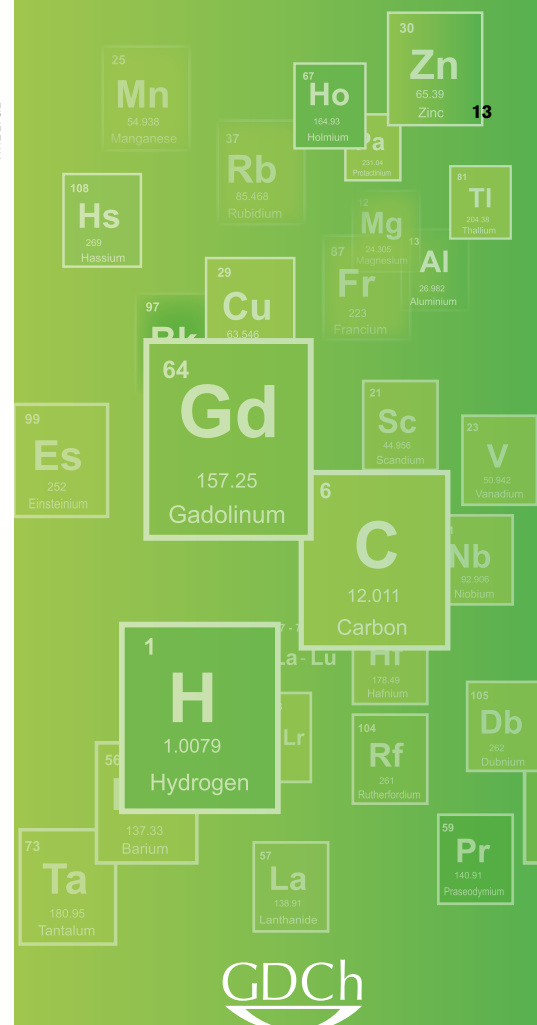
BILD: NASA/JPL-CALTECH

## 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 GDCh-Mentoringprogramm für chemische Nachwuchskräfte
- ➔ Publikationen rund um die Karriere
- ➔ Coachings und Workshops
- ➔ Jobbörsen und Vorträge
- ➔ Einkommensumfrage

ANZEIGE



Auf King  
George Island in  
der Antarktis  
brütende Zügel-  
pinguine.

FOTO: PAUL-ANTOINE LIBOUREL, LYON NEUROSCIENCE RESEARCH CENTRE, FRANCE

## SEKUNDENSCHLAF

Was sich mancher im hektischen Alltag wünscht, haben Pinguine perfektioniert: die Fähigkeit, nur kurz wegzunicken und sich dabei doch zu erholen. Ein internationales Team unter Beteiligung des Max-Planck-Instituts für biologische Intelligenz hat die Gehirnaktivität von Zügelpinguinen während der Brutperiode aufgezeichnet und dabei entdeckt, dass die Vögel im Schnitt nur vier Sekunden am Stück schlafen, aber dafür in der Brutzeit bis zu etwa 600-mal pro Stunde in einen solchen Mikroschlaf fallen. Über den ganzen Tag verteilt, kommen sie so auf bis zu zwölf Stunden des sogenannten *slow wave sleep*, der für Vögel typischen Schlafform. Dabei kann abwechselnd mal die eine und mal die andere Gehirn-

hälfte kurz wegnicken, oder beide Hälften können gemeinsam schlummern. Auch schwimmend auf dem Meer können die Tiere schlafen, dann allerdings fast ausschließlich mit beiden Gehirnhälften. Besonders am Rand einer Kolonie besteht die Gefahr, dass Bruträuber die Gelegenheit nutzen und Pinguinen, die mit beiden Hirnhälften schlafen, die Eier stehlen. Wie die Messungen zeigen, schlafen Pinguine am Rand jedoch nicht länger und auch nicht häufiger nur mit einer Hirnhälfte als Tiere in der Mitte der Kolonie. Das ungewöhnliche Schlafverhalten der Pinguine ist offenbar mehr eine Folge der Störungen und Aggressionen durch Artgenossen als der Furcht vor Räubern.

[www.mpg.de/21167999](http://www.mpg.de/21167999)

## FASTEN IM ALTER

Kuren, bei denen sich Fasten und Essen abwechseln, halten den Stoffwechsel flexibel. Auf diese Weise fördert Intervallfasten die Gesundheit und steigert die Lebenserwartung. Aus Studien mit unterschiedlichen Tierarten weiß man jedoch, dass die Wirkung solcher Kuren mit dem Alter abnimmt. Forschende des Max-Planck-Instituts für Biologie des Alterns haben nun den Grund dafür gefunden. Sie haben Killifische in verschiedenen Altersstufen Fastenperioden verordnet und die Reaktion des Fettgewebes der Fische auf das Ende des Fastens untersucht. Anders als bei jungen Fischen versetzt Fasten das Fettgewebe alter Tiere in einen dauerhaften Ruhemodus. Dadurch werden der Energiestoffwechsel heruntergefahren, die Proteinproduktion reduziert und das Gewebe nicht erneuert. Dies wirkt sich negativ auf den Energiehaushalt des gesamten Körpers aus. Eine Untereinheit eines zellulären Energiesensors, der sogenannten AMP-Kinase, spielt dabei eine zentrale Rolle. Sie ist bei älteren Fischen weniger stark aktiv als bei jüngeren. Möglicherweise beeinflusst dieses Molekül auch den Alterungsprozess beim Menschen, denn wer höhere Werte der AMP-Kinase-Untereinheit besitzt, ist im Alter gesünder. Die Forschenden wollen deshalb als Nächstes Moleküle finden, welche die Untereinheit aktivieren und die Gesundheit im Altern fördern.

[www.mpg.de/21104827](http://www.mpg.de/21104827)

## STERNENWIEGE OHNE UV-KATASTROPHE

Die UV-Strahlung der Sonne kann zwar einen Sonnenbrand verursachen und im schlimmsten Fall auch Hautkrebs, das Leben auf der Erde hat sie aber nicht verhindert. Doch das ist auf vielen Planeten des Universums anders. In der Nähe von mehr als der Hälfte aller Sternensysteme und ihrer Planeten, darunter möglicherweise auch unseres Sonnensystems, gab oder gibt es besonders massereiche Sterne. Diese grünen während ihres kurzen Lebens viele Planeten mit intensiver UV-Strahlung. Komplexe Moleküle und damit Leben, so dachte man, könnten dort nur schwer entstehen. Ein Team um María C. Ramírez-Tannus vom Max-Planck-Institut für Astronomie wollte das überprüfen und untersuchte mit dem James-Webb-Welt-

raumteleskop erstmals die Geburtsstätte von Planeten in einer wahrlich unwirtlichen Gegend – nämlich in der 5500 Lichtjahre entfernten Sternentstehungsregion NGC 6357. Im Materialreservoir der Gas- und Staubscheibe namens XUE-1 entdeckten die Forschenden zu ihrer Überraschung Wasser, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Acetylen und Silikatstaub. Dies alles sind Schlüssel-moleküle für die Bildung erdähnlicher Planeten und teilweise auch für die Entstehung des Lebens – und das trotz der enormen Strahlung benachbarter Riesensterne. Planeten wie die Erde könnten demnach unter wesentlich raueren Bedingungen entstehen, als die Forschung bisher angenommen hat.

[www.mpg.de/21123241](http://www.mpg.de/21123241)



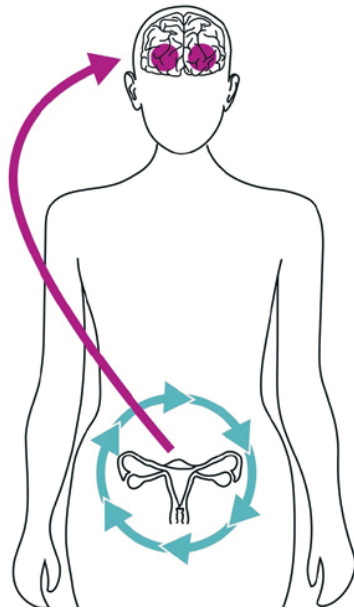
BILD: MARIA CRISTINA FORTUNA  
(WWW.MARIACRISTINAFORTUNA.COM)

Illustration eines Sternentstehungsgebiets mit einer planetenbildenden Scheibe im Vordergrund und einem massereichen Stern oben links.

## ZYKLUS IM GEHIRN

Schwankungen im weiblichen Hormonhaushalt wirken sich auf das Gehirn aus. Wie ein Team um Forscherinnen des Max-Planck-Instituts für Kognitions- und Neurowissenschaften beobachtet hat, wachsen und schrumpfen manche Hirnregionen während des Menstruationszyklus. Das Team nahm von 27 Probandinnen an sechs verschiedenen Zeitpunkten unter anderem Blutproben und machte Kernspinaufnahmen des Gehirns. So stellten die Forschenden fest, dass bei hohen Östradiol- und niedrigen Progesteronspiegeln, wie sie um den Eisprung herum typisch sind, manche Regionen des medialen Temporallappens der Großhirnrinde wachsen. Diese Hirnareale sind wichtig für Teile des Langzeitgedächtnisses und für die räumliche Wahrnehmung. Welche neurologischen Veränderungen genau die Regionen wachsen lassen, ist noch unklar. Ein Teil der Volumenzunahme könnte aber dadurch zu erklären sein, dass die Zahl der synaptischen Verbindungen zwischen den Nervenzellen steigt.

[www.mpg.de/20962828](http://www.mpg.de/20962828)



Im Laufe des Menstruationszyklus wachsen und schrumpfen Hirnareale in der Großhirnrinde von Frauen.

## KOLLEKTIV ZU BESSEREN DIAGNOSEN

Medizinische Diagnosen werden deutlich genauer, wenn mehrere Ärztinnen und Ärzte ihre Kompetenz bündeln. Zu 76 Prozent trifft eine Diagnose zu, wenn sie die Urteile von zehn medizinischen Fachleuten zusammenführt. Stellt eine Person alleine eine Diagnose, liegt sie nur zu 46 Prozent richtig. Das hat ein internationales Team, an dem Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung maßgeblich beteiligt waren, an mehr als 1300 medizinischen Fällen aus einer weltweiten Datenbank nachgewiesen. In der Medizin können gepoolte Einschätzungen Leben retten – allein in den USA sterben jährlich rund 250000 Menschen wegen ärztlicher Fehler, von denen viele bei der Diagnose gemacht werden. Bisher ließen sich mehrere Expertenurteile allerdings nur dann automatisiert und damit effizient auswerten, wenn sie standardisiert formuliert waren. Das ist bei medizinischen Diagnosen jedoch selten der Fall. Um die Aussagen verschiedener Fachleute trotzdem zusammenzuführen, nutzt das Team unter anderem künstliche Intelligenz. Derzeit arbeiten die Forschenden daran, ihre Entwicklung in die medizinische Praxis zu bringen.

[www.mpg.de/20990363](http://www.mpg.de/20990363)

15

# 5 000 000

Todesfälle pro Jahr könnten durch die Abkehr von fossilen Brennstoffen verhindert werden.

## ENERGIEWENDE RETTET MILLIONEN LEBEN

Der rasche Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe würde nicht nur den Klimawandel bremsen. Er könnte pro Jahr weltweit auch fünf Millionen Todesfälle durch Luftverschmutzung verhindern. Zu diesem Ergebnis kommt ein internationales Team, an dem auch Forscher des Max-

Planck-Instituts für Chemie beteiligt waren. Die Forschenden haben die Belastung durch Luftverschmutzung, vor allem mit Feinstaub und Ozon, sowie deren gesundheitliche Auswirkungen ermittelt. Dabei ordneten sie sowohl die Gesamtsterblichkeit als auch die krankheitspezi-

fischen Sterbefälle bestimmten Emissionsquellen zu. So haben sie gezeigt, dass etwa die Hälfte der Opfer fossiler Brennstoffe an Herz-Kreislauf-Erkrankungen sterben, die vor allem durch Feinstaub verursacht oder verschlimmert werden.

[www.mpg.de/21184507](http://www.mpg.de/21184507)



Plattwürmer können Körperteile unterschiedlich gut nachwachsen lassen. Das könnte unter anderem damit zusammenhängen, wie sich die Arten fortpflanzen.

## EUROPA IM HITZESTRESS

Extreme Hitze- und Dürreperioden, die noch vor 20 Jahren praktisch unmöglich waren, sollte der menschengemachte Klimawandel eigentlich erst gegen Ende des Jahrhunderts vermehrt mit sich bringen. Doch neue Berechnungen eines Teams, an dem auch Forscher des Max-Planck-Instituts für Meteorologie beteiligt waren, haben ergeben, dass diese Extreme sich bereits früher häufen könnten. Demnach verstärkt eine natürliche Klimaveränderung, bei der die Oberflächentemperatur des Nordatlantiks über mehrere Jahrzehnte schwankt, die Auswirkungen der Erderwärmung. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit für extreme Hitze- und Dürreperioden bereits in den nächsten beiden Jahrzehnten auf zehn Prozent. Und schon 2050 besteht eine ebenfalls zehnpromtente Wahrscheinlichkeit, dass es in zwei aufeinanderfolgenden Jahren zu extremen Hitzeperioden kommt.

[www.mpg.de/21215014](http://www.mpg.de/21215014)

## KOPFLOS, ABER SEXY

Schlägt man dem Ungeheuer Hydra aus der griechischen Mythologie einen Kopf ab, wachsen ihm zwei neue nach. Auch einige Plattwurmarten sind wahre Meister darin, Körperteile wieder neu zu bilden. Generell können nur wenige Tiere Körperteile regenerieren, dabei würde es für das Überleben Vorteile bieten. Forschende des Max-Planck-Instituts für Multidisziplinäre Naturwissenschaften haben nun eine Erklärung gefunden, warum manche Arten in der Evolution die Fähigkeit zur Regeneration entwickelt haben und andere nicht. Eine zentrale Rolle spielt ein Signalweg innerhalb von Zellen namens Wnt. Ist der Signalweg „angeschaltet“, bildet ein Tier einen neuen Schwanz, steht er auf „Aus“, entsteht ein Kopf. Die Wnt-Signale

steuern aber auch die Bildung von Hoden und Eidotter. In sich sexuell fortpflanzenden Plattwurmarten muss der Wnt-Signalweg also aktiv sein, damit sie Eier und Spermien produzieren können. Dies geht jedoch auf Kosten der Regenerationsfähigkeit, denn ohne Kopf kommen die Würmer nicht weit. Plattwürmer, die sich ungeschlechtlich fortpflanzen, müssen dagegen Körperteile neu bilden können, denn zur Vermehrung spalten sie sich in zwei Teile, die dann jeweils zu einem vollständigen neuen Organismus heranwachsen. Plattwürmer haben die Fähigkeit zur Regeneration also möglicherweise für die ungeschlechtliche Fortpflanzung durch Teilung und nicht zum Zweck der Reparatur von Wunden entwickelt.

[www.mpg.de/20975957](http://www.mpg.de/20975957)

16



Mönchsittiche stammen ursprünglich aus Südamerika. In den vergangenen Jahrzehnten haben aus dem Zoohandel entflozene Tiere in europäischen Städten neue Populationen aufgebaut.

## PAPAGEIEN-SPRECH

„Wir können alles außer Hochdeutsch“, sagen die Schwaben von sich. Zumindest was den Dialekt angeht, könnte es manchen Papageien ähnlich gehen. Forschende der Max-Planck-Institute für Verhaltensbiologie in Konstanz und für evolutionäre Anthropologie in Leipzig haben Mönchsittiche untersucht, die sich in den letzten 50 Jahren in Europa ausgebreitet haben. Sie haben die Lautäußerungen der Vögel in acht Städten in Spanien, Belgien, Italien und Griechenland aufgenommen und mit einer neuartigen statistischen Methode überprüft. Ihre Analysen zeigen, dass die Sittiche die Höhen

und Tiefen ihrer Rufe in jeder Stadt anders modulieren. Innerhalb einzelner Städte unterscheiden sich die Rufe dagegen nicht. Die Dialekte der Mönchsittiche in Europa könnten folglich dadurch entstanden sein, dass Individuen beim Imitieren von Artgenossen kleine Fehler machen, die sich von Stadt zu Stadt unterscheiden und mit der Zeit anhäufen. Zuvor hatten die Forschenden bereits entdeckt, dass jedes Tier möglicherweise einen einzigartigen Stimmklang besitzt. Es könnte sein, dass Mönchsittiche einander ähnlich wie die Menschen an der Stimme erkennen.

[www.mpg.de/21167022](http://www.mpg.de/21167022)





FORWARD.  
VISION.  
FUTURE.

---

€ 25,000

---

Apply until  
February 15<sup>th</sup>, 2024

---

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

---

For more information visit  
[www.mpg.de/hermann-neuhaus-prize](http://www.mpg.de/hermann-neuhaus-prize)

*Hermann Neuhaus's*  
**Hermann  
Neuhaus  
Prize**

---

# RECHT AN DER GRENZE

Aufnahmekriterien, Verteilungspläne oder Asylverfahren an den Außengrenzen der EU: Die beschlossene EU-Asylreform soll vieles klären. Dass Grenzverfahren effektiv und rechtssicher gestaltet sein sollten, fordern Ulrich Becker und Constantin Hruschka.

18

Kurz vor Weihnachten einigten sich Europäischer Rat, Parlament und Kommission unter anderem auf Asylverfahren an den EU-Außengrenzen. Wie sie konkret ausgestaltet sein sollten, stand zu Redaktionsschluss noch nicht fest. Bereits seit Sommer 2023 wurden Grenzverfahren als mögliches Mittel zur Bekämpfung der Schleuserkriminalität und Entlastung der nationalen Behörden vermehrt diskutiert. Dahinter steht zudem das Bestreben der EU-Mitgliedstaaten, die Zuwanderung besser zu kontrollieren und schneller über eine Zugangsberechtigung von Schutzsuchenden zu entscheiden.

Grenzverfahren – das heißt Anerkennungsverfahren für schutzsuchende Personen, die an einer Grenze durchgeführt werden – sind keineswegs völlig neu. Sie sind seit mehr als 30 Jahren Teil der Asylpolitik vieler Länder. In Deutschland finden solche Verfahren seit 1993 an den internationalen Flughäfen als sogenannte Flughafenvorfahren statt. Wird dort festgestellt, dass eine Person, die die Einreisevoraussetzungen nicht erfüllt, offensichtlich keinen Schutzbedarf hat, wird ihr die Einreise verweigert, und die Fluglinie, die die Person befördert hat, ist verpflichtet, diese Person wieder an den Abflugort zu transportieren; praktisch hat das wegen des Verbots, Passagiere ohne Visa zurückzubefördern, kaum Bedeutung.

—>

# ZUR SACHE

## ULRICH BECKER UND CONSTANTIN HRUSCHKA



ILLUSTRATION: SOPHIE KETTERER FÜR MPFG

Ulrich Becker ist Direktor am Max-Planck-Institut für Sozialrecht und Sozialpolitik in München. Als Staats- und Europarechtler beschäftigt er sich vor allem mit den Eigenheiten und der Entwicklung des Sozialrechts sowie mit migrationsrechtlichen Fragen.

Constantin Hruschka forscht unter anderem zur Verantwortungsteilung beim Flüchtlingsschutz und beriet zuletzt den Europäischen Ausschuss der Regionen bei dessen Positionierung zu den Reformvorschlägen.

---

## KONTINGENT- AUFNAHMEN LASSEN DIE ZAHL DER ASYL- VERFAHREN SINKEN

Jetzt sind mit dem Ausbau von Grenzverfahren große Erwartungen verbunden, und zwar in ganz unterschiedliche Richtungen. Die einen halten diese Verfahren für einen wichtigen Baustein zur Eindämmung irregulärer Migration. Die anderen sehen in diesen Verfahren die Abschiebung von Verantwortung und befürchten eine Aushöhlung des Asylrechts, weil die Prüfung von Schutzgesuchen an der Grenze zwangsläufig zu Menschenrechtsverletzungen führen würde. Angesichts dieser gegensätzlichen Positionen hilft ein nüchterner Blick auf die rechtlichen Vorgaben, um Chancen von und Anforderungen an Grenzverfahren einschätzen zu können.

Wozu können Grenzverfahren dienen? Dazu sollte man erstens wissen, warum überhaupt Verfahren stattfinden müssen, und zweitens, wo diese Verfahren durchzuführen sind.

Die Notwendigkeit von Verfahren folgt daraus, dass sich Staaten nach dem Ersten Weltkrieg darüber verständigt haben, Menschen aus anderen Ländern nicht nur aufzunehmen, weil sie auf ihrem Arbeitsmarkt nachgefragt werden, sondern auch, um ihnen Schutz zu gewähren. Diese Aufnahme stellt einen humanitären Akt dar, der schrittweise in rechtlich verbindliche Vorgaben gefasst worden ist, insbesondere durch die Genfer Flüchtlingskonvention (GFK) aus dem Jahr 1951, die mit dem New Yorker Protokoll von 1967 weltweite Wirkung gewonnen hat. Allerdings ist damit zugleich eine Unterscheidung zwischen Menschen, die aus ihrem Heimatland fliehen, verbunden: nämlich zwischen denen, die die Voraussetzungen der Flüchtlingsdefinition in der GFK erfüllen, und denen, die das nicht tun. Man kann sich über den Sinn der Abgrenzung streiten, und die Schutzvoraussetzungen wurden auch zwischenzeitlich durch die Berufung auf Menschenrechte erweitert – aber es gibt gute Gründe, an ihr festzuhalten. Die Folge ist, dass Verfahren zur Überprüfung der Schutzberechtigung erforderlich sind.

Die Zahl der Asylverfahren lässt sich allerdings dadurch reduzieren, dass bestimmte Personengruppen ohne Einzelfallprüfung ein (vorübergehendes) Aufenthaltsrecht erhalten. So ist auf der Grundlage von EU-Recht erstmals für Geflüchtete aus der Ukraine verfahren worden. Diese Aufnahme von Gruppen oder Kontingenten ist allerdings ebenfalls nicht neu und wurde in Deutschland seit 1956 mehrfach praktiziert. Sie käme grundsätzlich auch für andere, etwa von bestimmten Kriegsgeschehen bedrohte Personengruppen in Betracht und würde zur Entlastung der übrigen Verfahren beitragen.

Die Notwendigkeit von Verfahren führt zum zweiten Punkt und der Frage, wo diese Verfahren durchgeführt werden sollen. Deutschland ist Teil des EU-Binnenmarktes, der nicht nur dem freien Warenverkehr dient, sondern als sogenannter Schengenraum auch der Freiheit des Personenverkehrs

ohne Kontrolle an den Binnengrenzen. Zur Flankierung wurde das Gemeinsame Europäische Asylsystem geschaffen, das auf verschiedenen EU-Gesetzen und seit den Verträgen von Amsterdam und Lissabon auf vertraglicher Grundlage beruht.

Nun kann man einwenden, dass dieses System nicht ausreichend funktioniert, auch weil sich die Kompetenzen von EU und Mitgliedstaaten vermischen. Aber es verleiht der Flüchtlingspolitik einen rechtlichen Rahmen. Danach können zwar ausnahmsweise Kontrollen an den Binnengrenzen wieder eingeführt werden, sie erlauben aber keine direkte Zurückschiebung von Schutzsuchenden in EU-Nachbarstaaten. Zudem bedarf es in einem gemeinsamen Raum gemeinsamer Entscheidungen über die Aufnahme von Menschen aus anderen Ländern. Grenzverfahren müssen deshalb an den Außengrenzen der EU durchgeführt werden, wenn sie wirksam den Zugang steuern können sollen.

Welche Steuerungswirkung können Grenzverfahren entwickeln? Zum einen sollen Grenzverfahren es ermöglichen, Personen, welche die Voraussetzungen für einen Schutz nicht erfüllen, nach der Prüfung dieser Voraussetzungen die Einreise zu verweigern, da das Asylverfahren, rechtlich gesehen, vor der Einreise durchgeführt wird. Aber selbst, wenn es auf dem eigenen Hoheitsgebiet stattfände, wäre mit grenznahen Verfahren immer noch die Aussicht auf bessere Kontrollierbarkeit, schnellere Verfahren und eine erfolgreiche Ab- oder Rückschiebung verbunden. Zum anderen sollen Grenzverfahren dafür sorgen, dass Personen nicht einreisen dürfen, die deshalb keinen Schutz jenseits der Grenze benötigen, weil ein Drittstaat bereit ist, die Prüfung des Schutzbedarfs zu übernehmen und bei positiver Prüfung selbst den Schutz zu gewähren. Das dafür erforderliche Prüfungsprogramm ist anders ausgerichtet: Es bleibt zwar bei dem Verbot sogenannter Pushbacks, also von Zurückweisungen ohne individuelle Prüfung des Schutzbedarfs; zu prüfen sind aber nicht die Fluchtumstände im Herkunftsstaat, sondern die Schutzumstände im Drittstaat.

## PUSHBACKS OHNE ASYL- VERFAHREN SIND UND BLEIBEN VERBOTEN

Es bleibt die Frage, wie Grenzverfahren zu gestalten sind. Um mit dem Schutz in Drittstaaten zu beginnen: Erforderlich ist, dass dritte Staaten bereit und in der Lage sind, bedrohten Personen in zweifacher Hinsicht Schutz zu gewähren, nämlich zum einen davor, in den Herkunftsstaat verbracht zu werden, und zum anderen auch davor, in den Drittstaaten menschenrechtswidrig behandelt zu werden. Unter diesen Voraussetzungen verbietet die GFK die Einbindung von Drittstaaten grundsätzlich nicht. Das ist der Hintergrund, vor dem das Vereinigte Königreich ein Abkommen mit Ruanda geschlossen hat, und zugleich der Grund, warum der britische Supreme Court dieses Abkommen im Herbst 2023 für rechtswidrig erklärt hat. Denn Drittstaaten müssen die Gewähr dafür bieten, Flüchtende vor

→

**SCHNELLE  
SCHWEIZ:  
KOMPLETTE  
PRÜFUNG  
BINNEN  
100 TAGEN**

Menschenrechtsverletzungen zu schützen. Tatsächlich sind bis heute auch andere Versuche, Asylverfahren komplett auf Drittstaaten auszulagern, weitgehend ohne Erfolg geblieben – erinnert sei nur an das Bemühen Australiens um Bootstransporte nach Papua-Neuguinea und Nauru oder der USA um entsprechende Abkommen mit Guatemala und Honduras. Was die kürzlich geschlossene Vereinbarung zwischen Italien und Albanien bringt, nach der aus Seenot gerettete Personen in Albanien durch italienische Behörden überprüft werden sollen – ähnlich dem US-amerikanischen *Remain in Mexico*-Programm – bleibt abzuwarten. Die mit ihr verbundenen rechtlichen Unklarheiten und die absehbare Schwierigkeit, selbst die geplanten maximal 3000 Aufnahmen in Albanien pro Monat zu realisieren, lassen erhebliche Zweifel daran aufkommen, dass es sich um mehr als einen symbolischen Akt handelt.

Daher wird es erforderlich bleiben, an den Außengrenzen der EU ein vollständiges Prüfprogramm zur Klärung der Schutzbedürftigkeit durchzuführen. Das bedeutet zweierlei: die Bereitstellung eines den rechtlichen Anforderungen entsprechenden Verfahrens und die Ermöglichung eines Aufenthalts, um dieses Verfahren betreiben zu können. Das Verfahren

muss nach allgemeinen menschenrechtlichen Standards fair und der Rechtsschutz effektiv sein, ferner soll mit vertretbarem Ressourcenaufwand innerhalb einer angemessenen Frist entschieden werden. Erforderlich ist, dass der von Geflüchteten geltend gemachte Schutzbedarf tatsächlich geprüft wird. Um die für das Verfahren benötigte Zeit zu verkürzen und die Aussichten auf eine Rückführung bei Verneinung des Schutzbedarfs zu erhöhen, sind auch kurze Verfahrensfristen vorzusehen und einzuhalten. Das darf allerdings nicht in Widerspruch geraten zu der Garantie des effektiven Rechtsschutzes. Der Rechtsschutz gegen die Entscheidungen muss mindestens den Zugang zu umfassenden Informationen sowie einer unabhängigen Prüfungsinstanz ermöglichen. Eine Klage gegen die Entscheidung muss im Hinblick auf den Vollzug der Ausreise aufschiebende Wirkung haben. Das bedeutet, dass eine angeordnete Ausreise erst nach der gerichtlichen Entscheidung zur Ausreisepflicht führt.

Schnelle und zugleich rechtsstaatliche Verfahren stellen also hohe Anforderungen an den mit ihnen betriebenen Aufwand. Es ist empfehlenswert, wie das Vorbild der Schweiz zeigt, den Schutzsuchenden eine Beratung und Rechtsvertretung zu gewähren, um die meisten Verfahren binnen 100 Tagen abzuschließen; die Unterbringung muss menschenwürdig sein, Familien, Menschen mit Behinderungen, Kinder und Jugendliche, Gewaltopfer sowie Kranke benötigen besondere Unterstützung. Ferner dürfen schutzsuchende Personen zwar auf einen Aufenthaltsort verwiesen werden, es darf sich aber um keine Freiheitsentziehung handeln. Der Gerichtshof der EU und der Europäische Gerichtshof für Menschenrechte

haben sich damit bereits in mehreren Verfahren beschäftigt, ohne dass allerdings die Anforderungen im Einzelnen schon geklärt wären. Auszugehen ist aber davon, dass ein Festhalten von Personen an der Grenze für eine beschränkte Zeit zulässig ist und dem tatsächlichen Betreiben des Verfahrens dienen muss, dass ferner die Umstände der Verfahrensdurchführung nicht einer praktischen Verfahrenshinderung dienen dürfen.

Vor dem Hintergrund dieser hier nur grob skizzierten rechtlichen Anforderungen lassen sich die derzeit vorliegenden Reformpläne der EU bewerten. Sie befinden sich gegenwärtig in einem Aushandlungsprozess zwischen den beteiligten Organen („Trilog“) und sollen bis zum Frühjahr 2024 beschlossen werden. Grenzverfahren können für unzulässige (etwa bei Antragstellern aus sicheren Drittstaaten) und für beschleunigt zu prüfende Anträge zum Einsatz kommen und sollen nicht länger als 12 Wochen dauern. Verpflichtend sind sie unter anderem bei Anträgen von Personen, die aus einem Staat kommen, für den die europaweite Schutzquote bei 20 Prozent oder weniger liegt. Dies gilt grundsätzlich bis zu einer

Obergrenze von 30 000. Allerdings soll in Krisenzeiten eine Ausdehnung möglich sein und zudem das Grenzverfahren auf 20 Wochen verlängert werden können. Insbesondere der letzte Punkt wird kritisch gesehen.

## RECHTSSTAAT- LICHE PRAXIS ALS SCHLÜSSEL

Grundsätzlich erlauben die Vorschläge aber eine rechtsstaatliche Ausgestaltung der Grenzverfahren. Worauf es letztlich ankommen wird, ist die Einhaltung der genannten Vorgaben in der praktischen Umsetzung. Dieser Praxisvorbehalt gilt im Übrigen auch für die zugleich angestrebten Solidaritätsmaßnahmen, die zu einer angemessenen Verteilung der Aufnahme von Schutzbedürftigen führen sollen. Einerseits haben EU-Mitgliedstaaten die Möglichkeit, sich von Aufnahmeverpflichtungen freizukaufen; andererseits sind finanzielle Verpflichtungen ein erster Ansatz, solange keine Aussicht auf die Durchsetzung EU-weiter Aufnahmequoten besteht. Das gilt insbesondere, wenn berücksichtigt wird, dass die Einführung rechtsstaatlicher Grenzverfahren aufwendig ist und die EU insgesamt dafür die Verantwortung tragen muss.

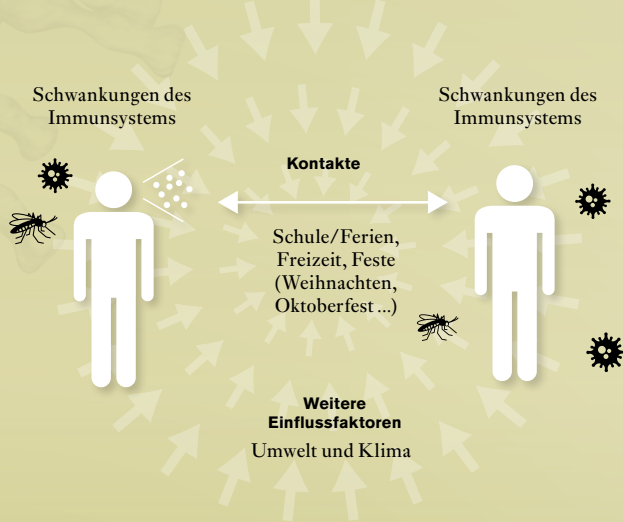
Zusammenfassend gilt: Grenzverfahren können rechtsstaatlich geregelt werden und dann dazu beitragen, die im Flüchtlingsrecht angelegte Unterscheidung von schutzbedürftigen und anderen Einreisewilligen effektiver zu treffen. Aber sie sind kein Allheilmittel. Sie reduzieren weder die Zahl der Flüchtenden, noch tragen sie zu einem sinnvollen Gesamtkonzept einer Verantwortungsteilung bei. Unerlässlich bleiben deshalb multilaterale Abkommen mit dritten Staaten, und unerlässlich ist vor allem die Bekämpfung der Fluchtursachen. Das alles ist nicht neu. Aber es ist wichtig, und es ist wieder einmal Zeit, daran zu erinnern.



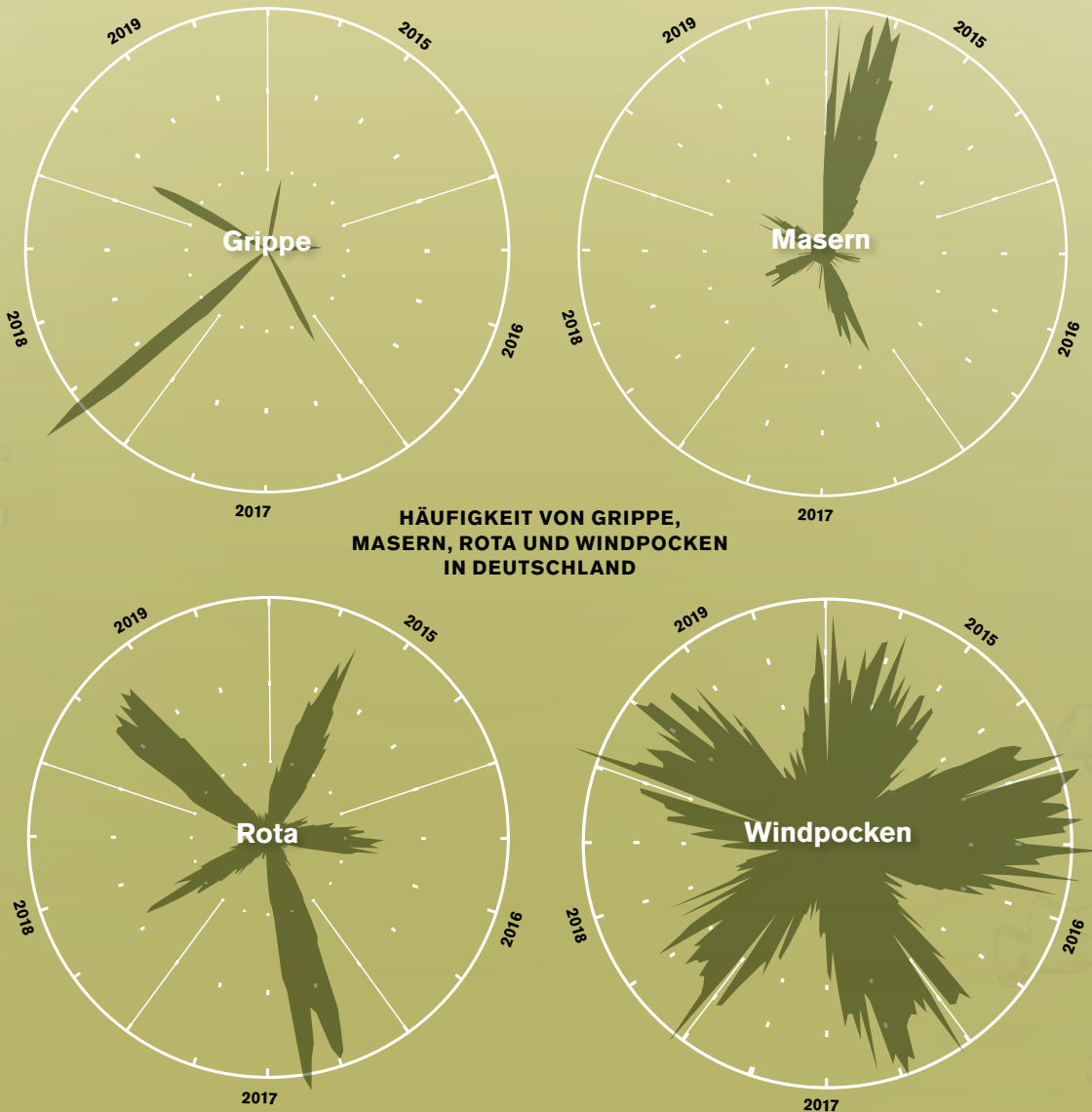
# HOCHSAISON FÜR VIREN

In den gemäßigten Breiten treten viele Virusinfektionen im Winter gehäuft auf. In den Tropen gibt es dagegen keine Jahreszeiten, trotzdem sind viele Infektionskrankheiten auch dort nicht gleichmäßig über das ganze Jahr verteilt. Wann eine Infektionswelle ihren Höhepunkt erreicht, hängt von mehreren Faktoren ab, zum Beispiel von saisonalen Temperaturschwankungen oder veränderten Kontaktraten empfänglicher Personen. Forschende des Max-Planck-Instituts für Infektionsbiologie haben die Saisonalität von Windpocken in Kolumbien entschlüsselt. Ihre Erkenntnisse können zur Entwicklung von Impfprogrammen beitragen.

## AUSLÖSER FÜR INFektionsWELLEN



24

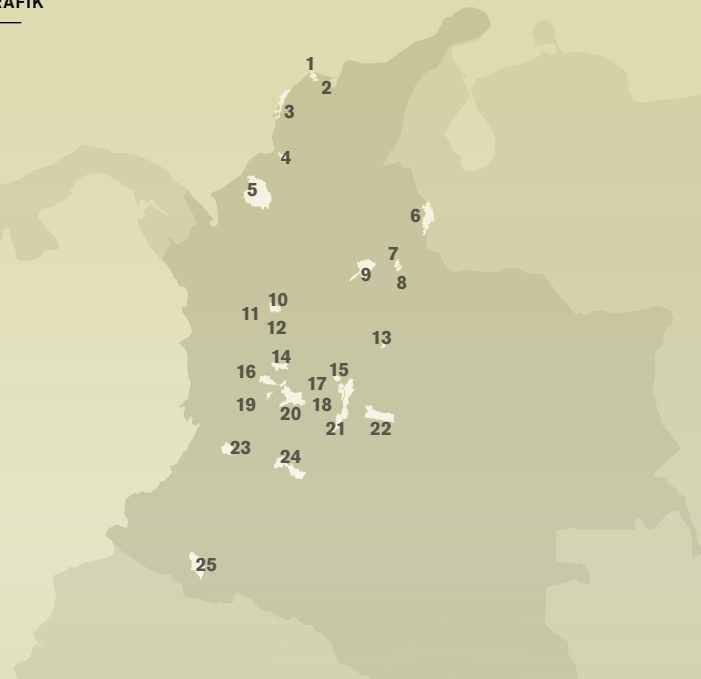


GRAFIK: GCO NACH BARRERO GUEVARA ET AL., 2023

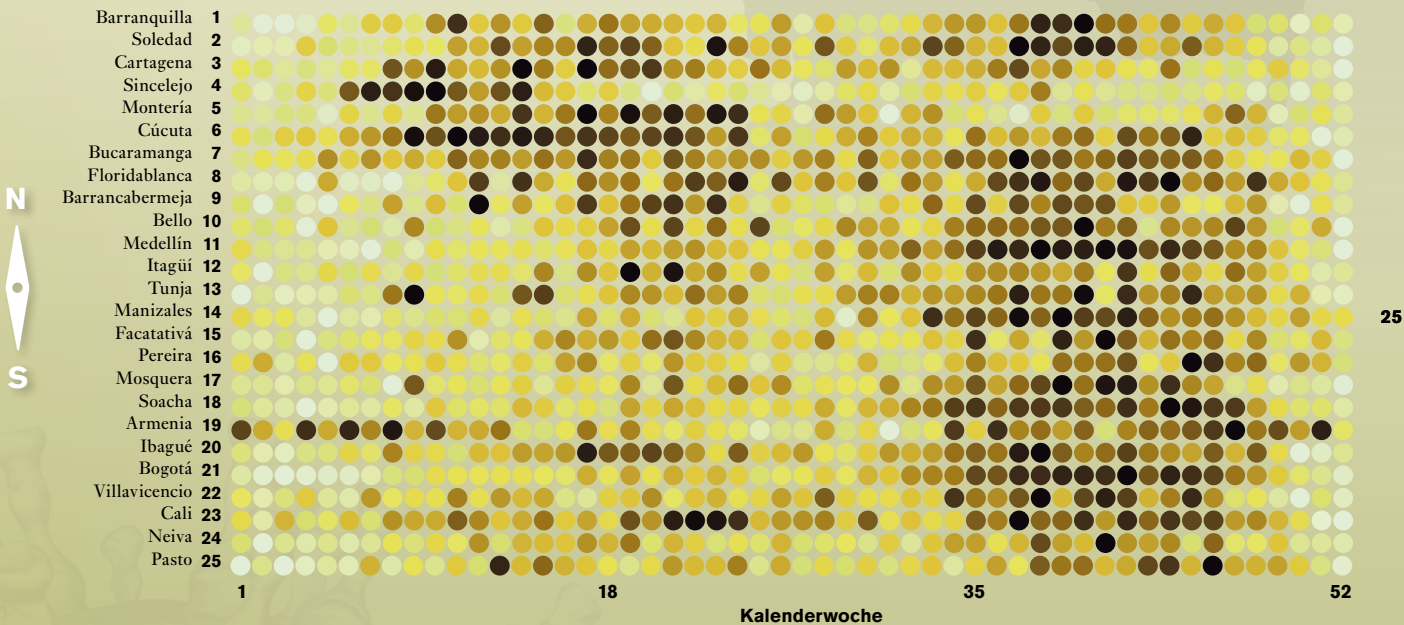


## WINDPOCKEN IN KOLUMBIEN UND DEUTSCHLAND

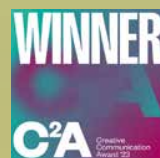
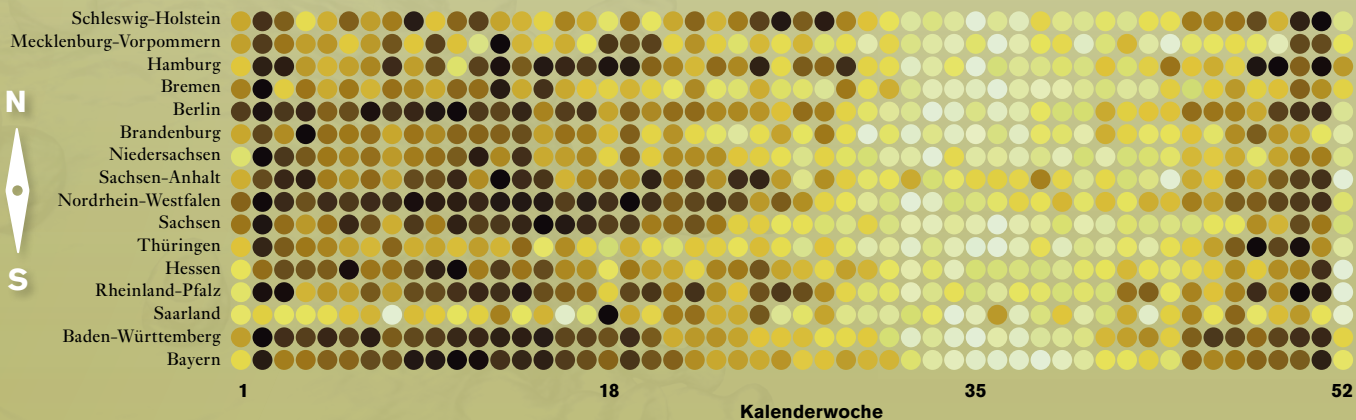
In Kolumbien treten Windpocken im April und Oktober vermehrt auf. In dem südamerikanischen Land gibt es keine Jahreszeiten wie in Deutschland, stattdessen schwankt die Luftfeuchtigkeit im Jahresverlauf. Im Norden sind die ersten Monate des Jahres trocken, dann steigt die Luftfeuchtigkeit an und bleibt bis Jahresende hoch. Im Süden nimmt sie dagegen Anfang des Jahres zu und geht gegen Jahresende wieder zurück. Die Forschenden vermuten, dass Windpocken in den trockenen Monaten und während der Schulzeit leichter übertragen werden. In den Gemeinden im Norden des Landes ist daher die Welle im April höher als die im Oktober. In den südlichen Gemeinden ist es umgekehrt. In Deutschland hingegen erreicht die Windpockensaison ihren Höhepunkt in allen Bundesländern zur selben Zeit.



### Kolumbien



### Deutschland



Unsere Infografiken wurden mit dem Creative Communication Award 2023 ausgezeichnet.

# IM FOKUS

## UNTER NULL

**26** | EISIGE ZEITEN

**32** | DIE GROSSE SCHMELZE

**38** | COLDFINGER

26

ILLUSTRATION: TOM BJÖRKLUND

Angehöriger der sogenannten Gravettien-Kultur. Diese begann vor etwa 32 000 Jahren und bestand etwa 8000 Jahre. Obwohl diese Menschen in vielen Teilen Mitteleuropas ähnlich aussehende Steinwerkzeuge herstellten, lebten sie offenbar in weitgehend isolierten Populationen. Die künstlerische Darstellung ist inspiriert von den archäologischen Funden in der Höhle von Arene Candide (Italien).



# EISIGE ZEITEN

TEXT: THOMAS TRAPPE

Kälte hat das Leben des Menschen in Europa jahrtausendlang geprägt. Von den Temperaturen in den Kaltzeiten des Eiszeitalters aus Mitteleuropa vertrieben, eroberte der *Homo sapiens* sich die vormals unbewohnbaren Regionen in den Warmzeiten immer wieder zurück. Diese Migrationen erforschen Johannes Krause und sein Team am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig.

Angefallen von einer Hyäne, in eine Höhle gezerrt und getötet – über das Schicksal der Frau, die vor mehr als 40 000 Jahren nahe der Höhle Zlatý kůň im heutigen Tschechien lebte, wäre heute nichts bekannt, hätten nicht Mitte des 20. Jahrhunderts Archäologen ihre Überreste entdeckt. Bissspuren an den Knochen zeugen bis heute von dem Drama. Seit den 1950er-Jahren lagen die Knochen weitestgehend unbeachtet in einem archäologischen Museum in Prag. Bis sie 2021 ein Geheimnis preisgaben, das weit über die Todesumstände des Opfers hinausweist. Sie sind nämlich der Beleg dafür, dass der moderne Mensch schon sehr viel früher nach Europa gekommen sein muss als bis dahin angenommen.

Der Fund verrät auch, wie schwer es für den *Homo sapiens* war, den immer wieder von Eis und Schnee bedeckten Kontinent dauerhaft zu erobern. Mithilfe der sogenannten Paläogenetik können Forschende das Erbgut jahrtausendealter Knochen analysieren und die Geschichte der Migration im eiszeitlichen Europa nachzählen. So entsteht das Bild eines Kontinents, in den Neandertaler und moderner Mensch mehrfach einwanderten und aus dem sie wieder verschwanden, wenn sie dem rauen Klima nicht gewachsen waren.

Johannes Krause ist einer der weltweit führenden Archäogenetiker. Als Doktorand hat der heute 43-Jährige an der Entschlüsselung des Neandertalergenoms durch Svante Pääbo mitgewirkt – eine Leistung, für die Pääbo 2022 mit dem Nobelpreis für Medizin ausgezeichnet wurde. Inzwischen ist Krause Direktor am

Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie. Den Arbeiten, an denen der Wissenschaftler mitgewirkt hat, verdanken wir unter anderem die Gewissheit, dass alle Menschen, die heute außerhalb des südlichen Afrikas leben, im Schnitt rund zwei Prozent Neandertaler-DNA in sich tragen. Mithilfe der DNA aus einem winzigen Fingerknochen gelang Krause auch die Entdeckung der Denisovaner, einer bis dato unbekannt Menschenform.

## Kalt und warm im Wechsel

Die Forschungsergebnisse aus der Archäogenetik zeigen, dass der moderne Mensch mehrere Anläufe benötigte, um in Europa dauerhaft Fuß zu fassen. Wann immer das Klima es zuließ, stieß der *Homo sapiens* aus dem Süden in den Norden vor. Und das immer wieder aufs Neue. Denn das Eiszeitalter, das vor zweieinhalb Millionen Jahren einsetzte und bis vor rund 11 500 Jahren

**„Wer mit den neuen Lebensbedingungen nicht zurechtkam, verschwand.“**

JOHANNES KRAUSE

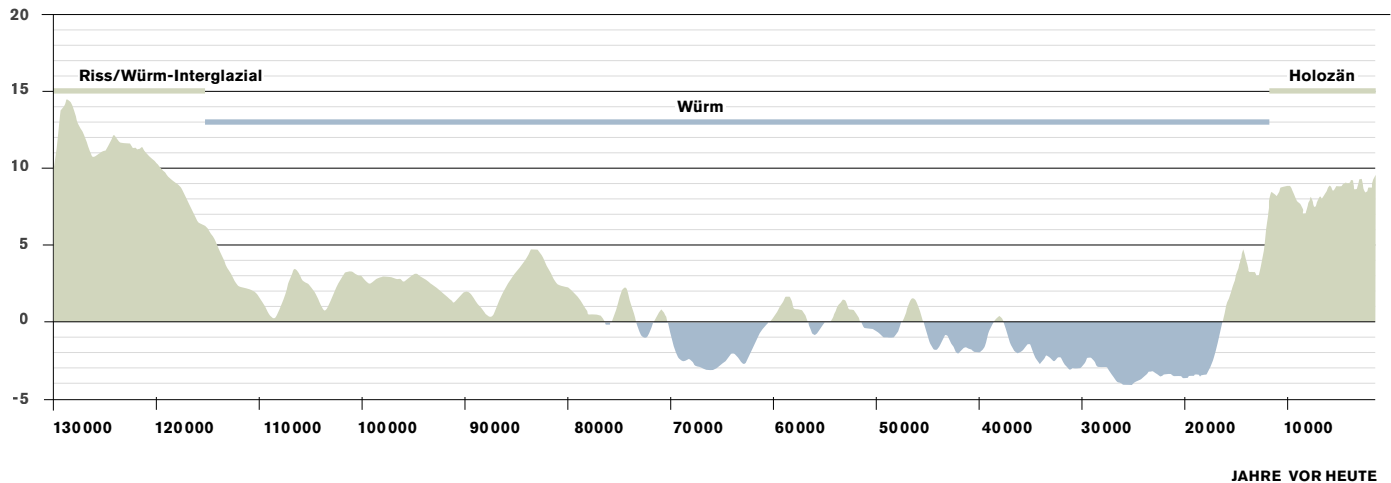
28

Mit seiner Forschung hat Johannes Krause unser Wissen über die Frühgeschichte des Menschen enorm erweitert. Gene und daraus abgeleitete Verwandtschaftsverhältnisse verraten dem Wissenschaftler die Wanderbewegungen der Neandertaler und der modernen Menschen im Eiszeitalter.



FOTO: SVEN DÖRING

## TEMPERATUR (IN °C)



Mittlere Jahrestemperatur in der Antarktis, wie sie anhand von Eisbohrkernen rekonstruieren lässt: Nach der im Alpenraum als Riss/Würm-Interglazial bezeichneten Warmzeit vor 130 000 bis 115 000 Jahren sanken die Temperaturen in der Antarktis innerhalb von 10 000 Jahren auf 0 Grad. Am Höhepunkt der im Alpenraum als Würm-Eiszeit bezeichneten Kaltzeit vor 24 000 Jahren lagen die Temperaturen bei minus 4 Grad. Vor 11 500 Jahren begann eine neue Warmzeit, die bis heute andauert: das Holozän.

andauerte, war keineswegs durchgängig kalt. Vielmehr wechselten Kalt- und Warmzeiten einander ab. Grund für diese Schwankungen waren Veränderungen der Erdumlaufbahn um die Sonne. Dadurch änderten sich der Abstand der Erde zur Sonne und damit auch die globale Temperatur. Auf den Höhepunkten mancher Warmzeiten lagen die globalen Durchschnittstemperaturen sogar über denen der Gegenwart. „Eigentlich leben wir heute auch nur in einer eiszeitlichen Warmphase“, sagt Krause.

Mit jedem Klimaumschwung veränderte sich auch die Pflanzen- und Tierwelt. Oftmals ging das mit einem radikalen Umbruch der Lebensgrundlagen einher, und manchmal machte das ganzen Populationen den Garaus. Hinzu kam, dass sich der *Homo sapiens* in Europa, im westlichen Zentralasien und im Nahen Osten seinen Lebensraum mit einer weiteren Menschenform teilte: dem Neandertaler. Dieser hatte sich vor der Ankunft des modernen Menschen rund 400 000 Jahre lang unter ganz unterschiedlichen klimatischen Bedingungen behauptet und sich sowohl in der Kältesteppe als auch in den Wäldern der Warmzeiten zurechtgefunden.

Die Frau aus der Höhle Zlatý kůň ist einer der ersten nachgewiesenen modernen Menschen in Europa. Die Erbgutanalyse ihrer Knochen ergab, dass ihre Vorfahren vor mehr als 45 000 Jahren auf den Kontinent gekommen sein müssen – und damit mindestens 2000 Jahre früher, als die Forschung bis dahin angenommen hatte. Dauerhaft halten konnten sich diese Menschen offenbar nicht, denn sie hinterließen keine Spuren im

Erbgut heute lebender Menschen. Irgendwann müssen ihre Nachkommen ausgestorben und die Linie von Zlatý kůň erloschen sein.

Die durch den Fund ermöglichte Neudatierung der vielleicht ersten Einwanderungswelle des modernen Menschen lässt Krause an einer bis heute gängigen Interpretation zweifeln: dass der *Homo sapiens* für das Aussterben des Neandertalers vor rund 39 000 Jahren verantwortlich sei. „Offensichtlich lebten die Populationen ja mehrere Tausend Jahre lang nebeneinander“, sagt Krause. Hinzu kommt, dass sich die beiden Menschenformen miteinander vermischt haben – Neandertalergene in unserem Erbgut zeugen bis heute davon. Krause vermutet, dass eine Naturkatastrophe maßgeblich zum Verschwinden der Neandertaler und der ersten modernen Menschen in Europa beigetragen haben könnte: der Ausbruch eines Supervulkans. Eine Eruption der Phlegräischen Felder in der Nähe des Vesuvs schleuderte damals riesige Mengen Asche in die Atmosphäre und verdunkelte die Sonne. In großen Teilen Europas bis ins heutige Russland sanken die Temperaturen daraufhin um mehrere Grad. Aufgrund des Lichtmangels und der dicken Ascheschicht dürfte die Vegetation in weiten Teilen Europas verkümmert gewesen sein. Dadurch war vielen Tieren und folglich auch den Neandertalern und den Nachfahren der Frau aus der Höhle Zlatý kůň die Nahrungsgrundlage entzogen. Darüber hinaus hatte der Ascheregen vermutlich in vielen Gebieten das Trinkwasser vergiftet.

„Der Vulkanausbruch ist aus meiner Sicht die schlüssigste Erklärung dafür, dass in jener Zeit nicht nur die Neandertaler verschwinden, sondern auch die modernen Menschen“, erklärt Johannes Krause. Der *Homo sapiens* hatte aber die Chance einer Neuansiedlung. Schon



vor ein paar Jahren haben Krause und sein Team menschliche Überreste untersucht, die in Kostenki im Westen Russlands entdeckt worden waren. Die Analysen ergaben, dass dieser Mensch einst in der Asche des Supervulkans bestattet worden war – folglich nach dem Ausbruch in dem Gebiet gelebt haben muss. Die aus den Knochen gewonnenen genetischen Spuren lassen sich in späteren eiszeitlichen Menschen bis hin zu den heutigen Europäern nachweisen.

Dabei waren die Voraussetzungen für diese Wiederbesiedlung Europas gar nicht besonders günstig, denn vor mehr als 30 000 Jahren begann eine neue Kaltzeit. Das Überleben wurde für Mensch und Tier immer schwieriger. Die Erbgutanalysen zeigen, dass die Populationen in jener Zeit massiv schrumpften. Dies bot eine Gelegenheit für Einwanderer, die vermutlich aus Osteuropa kamen. Fachleute haben diese und nachfolgende Populationen nach den Fundorten benannt; die Einwanderer aus dem Osten beispielsweise heißen Věstonice-Menschen – nach einer archäologischen Stätte in Tschechien. In Mitteleuropa trafen sie auf die Fournol, eine Gruppe, die damals vor allem das westliche Europa bis nach Süden auf die Iberische Halbinsel bewohnte. Die Věstonice-Menschen hatten bereits Techniken entwickelt, mit denen sie erfolgreich Mammuts und andere große Säugetiere erlegen konnten, die an das Leben in der sich vor mehr als 30 000 Jahren in Mitteleuropa ausbreitenden Kältesteppe angepasst waren und die angestammten west- und zentraleuropäischen Tierarten verdrängten. So starb die für die Menschen so gefährliche Höhlenhyäne in dieser Phase aus. „Was damals geschah, steht exemplarisch für die gesamte Eiszeit“, erklärt Krause. „Klimaschwankungen veränderten Flora und Fauna, und wer mit den neuen Lebensbedingungen nicht zurechtkam – egal ob Neandertaler oder moderner Mensch –, verschwand. Das eröffnete Chancen für besser angepasste Populationen.“ Vor 24 000 Jahren erreichte die Kälteperiode ihren Höhepunkt. Nur wenige Tiere und Pflanzen konnten nun in Mitteleuropa noch überleben. Die immer weiter vorrückenden Gletscher in Nordeuropa und den Alpen trieben die Fournol-Menschen in den äußersten Südwesten. Auf der Iberischen Halbinsel fanden sie während des Kältemaximums zusammen mit den dort bereits lebenden Menschen eine Heimat – abgeschottet vom restlichen Kontinent durch die vergletscherten Pyrenäen. Jahrtausendlang bot das iberische Refugium Schutz, während im Rest Europas menschliches

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die ersten bekannten Einwanderer des *Homo sapiens* kamen vor 45 000 Jahren nach Europa. Vor 39 000 Jahren bereitete ein Vulkanausbruch auf der italienischen Halbinsel dieser ersten bekannten Besiedlung jedoch ein Ende. Die Neandertaler starben in dieser Zeit aus.

Den Höhepunkt der letzten Kaltzeit vor 24 000 Jahren überlebten die Menschen auf der Iberischen Halbinsel und dem Balkan. Mitteleuropa und die italienische Halbinsel waren dagegen menschenleer.

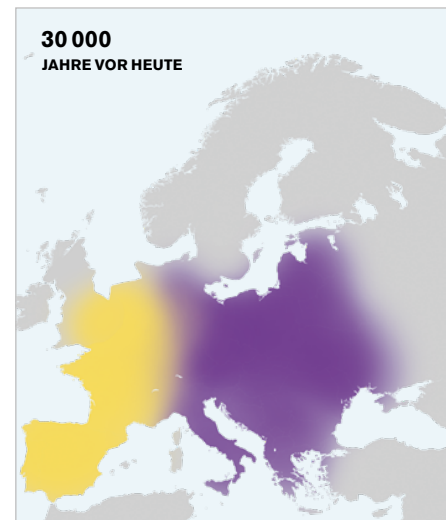
Mit wieder steigenden Temperaturen vor 19 000 Jahren kehrten Menschen, ausgehend von der Iberischen Halbinsel, wieder zurück. Etwa zeitgleich wanderten Menschen aus der Balkanregion in das heutige Italien ein. Nachkommen dieser Einwanderer breiteten sich vor ca. 14 500 Jahren über ganz Mitteleuropa aus und sind bis heute Teil unseres genetischen Erbes.

Leben unmöglich war. Erst 5000 Jahre später, also etwa vor 19 000 Jahren, begannen die Gletscher zu tauen, und die Menschen kehrten zurück.

Die archäogenetischen Daten, die Krauses Team im März 2023 veröffentlichte, belegen, dass – anders als zuvor angenommen – auch in Italien während des Höhepunkts der Kältezeit keine Menschen lebten. Erst als die Temperaturen stiegen, wanderten moderne Menschen aus der Balkanregion entlang der Adria wieder in das heutige Italien ein. Die dort gedeihenden Wälder boten den Neuankömmlingen gute Lebensbedingungen. Sie werden heute als Villabruna-Menschen bezeichnet.

Als vor 14 500 Jahren eine rund 2000 Jahre dauernde Warmzeit einsetzte und die Temperaturen innerhalb kurzer Zeit anstiegen, begannen sich die Villabruna von Italien aus über große Teile Europas auszubreiten. Sie verdrängten die Nachfahren der Fournol, die während des Höhepunkts der letzten Kaltzeit südlich der Pyrenäen überlebt und Mitteleuropa von dort aus wiederbesiedelt hatten. Die Fournol konnten sich nur auf der Iberischen Halbinsel halten. „Die Spuren dieser Umwälzung können wir heute noch im Erbgut der Menschen von da-

- FOURNOL
- VESTONICE
- GOYET Q2
- VILLABRUNA
- OBERKASSEL
- SIDELKINO
- NACHFAHREN DER FOURNOL



GRAFIK: GCO NAGH POSHL, C., VU, H., GHALLIGU, A. ET AL. PALAEOGENOMICS OF UPPER PALAEO-LITHIC TO NEOLITHIC EUROPEAN HUNTER-GATHERERS. NATURE 613, 117–126 (2023)

mals ablesen: Unsere Analysen zeigen, dass die Gene der aus Italien kommenden Menschen nach nur etwa 500 Jahren im Erbgut der Menschen im heutigen Deutschland, in Frankreich und Großbritannien dominierten.“ Die Gene der in der Forschung so genannten Oberkassel-Menschen machen bis heute einen Teil des Erbguts der Europäer aus.

„Ausschlaggebend für diese Einwanderungswelle war vermutlich erneut ein Klimaumschwung“, sagt Johannes Krause. Der dank der Erwärmung nach Norden vordringende Wald ersetzte nach und nach die Steppenvegetation der Eiszeit. Für die Jagd kleiner und schneller Wildtiere waren nun andere Jagd- und Sammeltechniken sowie Wissen über die essbaren Pilze und Pflanzen des Waldes erforderlich – Fähigkeiten, welche die Neuankömmlinge der Villabruna aus der zu jener Zeit bereits bewaldeten italienischen Halbinsel perfekt beherrschten.

## Bauern aus Anatolien

Als Nächstes wanderten vor rund 8000 Jahren Ackerbauern aus dem südlichen Anatolien ein und vermischten sich im Laufe der Zeit mit den einheimischen Oberkassel-Menschen. „Ötzi“ zum Beispiel war ein direkter Nachfahre dieser Einwanderer aus Anatolien. Zu diesem Ergebnis kam eine Untersuchung, die Johannes Krause und sein Team 2023 veröffentlichten. Der vor mehr als 5000 Jahren im Hochgebirge gestorbene „Mann aus dem Eis“ gehörte anscheinend zu einer Gruppe, die sehr isoliert in den Alpen lebte – eine Ausnahme in der Besiedlungsgeschichte Europas.

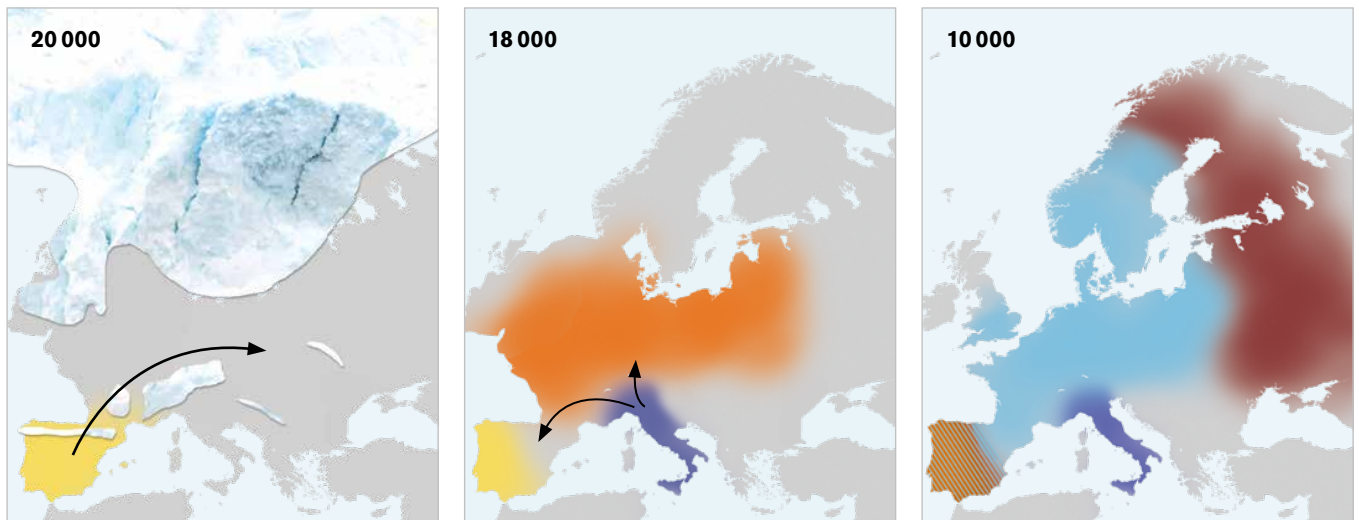
Aber bei diesen Einwanderern blieb es nicht: Krauses Team entdeckte eine weitere Komponente im Genpool heutiger Europäer: Vor 5000 Jahren etwa kamen Angehörige eines Nomadenvolkes aus der Region nördlich des Schwarzen Meers nach Mitteleuropa. Sie müssen schnell zur dominierenden Gruppe geworden sein – der Anteil der „Steppengene“ im Erbgut betrug schon nach wenigen Hundert Jahren rund 30 Prozent. Gab es wieder einen Temperatursturz? Oder waren die Ankömmlinge keine friedlichen Einwanderer, sondern Eroberer? Für beides gibt es keine Hinweise. Stattdessen könnte Mitteleuropa zu jener Zeit in weiten Teilen menschenleer gewesen sein: DNA-Spuren des Pestbakteriums in Knochen aus jener Zeit deuten darauf hin, dass eine der ersten Pestepidemien der Geschichte große Teile der Bevölkerung dahingerafft und so den Boden für die nächste Einwanderungswelle bereitet hatte.

Auch wenn das Klima mit dieser vorerst letzten großen genetisch nachweisbaren Migration nach Europa nichts zu tun hatte – es hat die Besiedlung des Kontinents jahrtausendlang nachhaltig beeinflusst. Mal war der *Homo sapiens* Opfer des Klimas, mal hat er davon profitiert. Heute steht der Mensch erneut vor einschneidenden Veränderungen. Die Temperaturen steigen so schnell wie nie zuvor in den vergangenen zehntausend Jahren, in denen die menschliche Kultur aufblühte – dieses Mal sind nicht Schwankungen der Erdumlaufbahn Ursache, sondern der massive Ausstoß von Treibhausgasen. Statt einer Eiszeit steht dem Menschen nun eine Heißzeit bevor. In manchen Regionen wird das Überleben schwierig oder gar unmöglich werden. Und so wird das Klima die Migrationsgeschichte des Menschen erneut prägen.

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

31

Mithilfe prähistorischer DNA lässt sich der Stammbaum des modernen Menschen in Europa rekonstruieren. Die nach archäologischen Fundstätten benannten Populationen waren immer wieder genetisch voneinander getrennt, Wanderbewegungen haben jedoch auch immer wieder für genetischen Austausch gesorgt (schwarze Pfeile). Die Gletscherbedeckung ist nur zum Zeitpunkt der maximalen Vereisung gezeigt. Die Küste Europas verlief während der letzten Kaltzeit wegen des tieferen Meeresspiegels anders als heute.



Schwindende Pracht: Die Eisschilde Grönlands und der Antarktis schrumpfen. So bricht etwa von den Gletschern des Mogens-Heinesen-Fjords im südwestlichen Grönland Eis ab und gelangt in die Ozeane.





# DIE GROSSE SCHMELZE

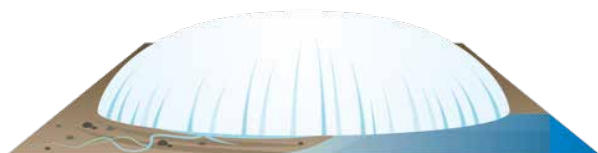
TEXT: KLAUS JACOB

FOTO: BENOIT LECAVALIER

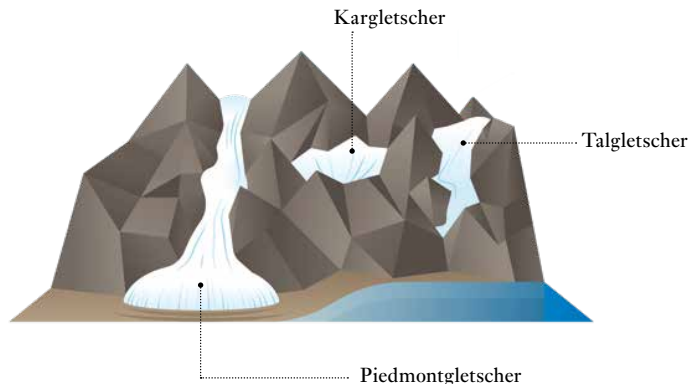


Der Klimawandel lässt die Eisschilde Grönlands und der Antarktis schmelzen und den Meeresspiegel steigen. Inselstaaten und Küstenstädten könnte das zum Verhängnis werden. Wie stark die Eiskappen schrumpfen, hängt auch von den Rückkopplungen zwischen ihnen und dem Klimasystem ab. Diese Effekte untersuchen Marie-Luise Kapsch und Clemens Schannwell am Max-Planck-Institut für Meteorologie.

## KONTINENTALE EISSCHILDE



## ALPINE GLETSCHER



Gletschertypen: Die Eisschilde Grönlands und der Antarktis enthalten zusammen rund 33 Millionen Kubikkilometer Eis. Das ist achtmal so viel, wie das Mittelmeer Wasser enthält, und rund 99 Prozent der Eismassen an Land. In Gebirgen gibt es unter anderem Piedmont- oder Vorlandgletscher, die aus einem Tal ins Flachland fließen und sich dort ringförmig ausbreiten. Talgletscher bewegen sich durch ein Tal hinab. Sie tragen zwar weniger als ein Prozent zu den globalen Eismassen bei, zu ihnen gehören aber die meisten bekannten alpinen Gletscher wie etwa der Aletschgletscher. Kargletscher finden sich in sonnengeschützten, kesselförmigen Mulden und können daher in tieferen Lagen auftreten als andere Gletscher.

GRAFIK: A DOBESTOCK

34

Von wegen „ewiges Eis“: An den Polen herrscht Tauwetter. In der Arktis steigen die Temperaturen zwei- bis dreimal so schnell wie im globalen Mittel. Die Wärme setzt nicht nur dem Meereis zu, sodass immer mehr Schiffe die Nordwestpassage befahren können, den Seeweg durch das Nordpolarmeer, der Atlantik und Pazifik verbindet. Auch der Eisschild, der Grönland bedeckt, muss erhebliche Verluste hinnehmen – mit weltweiten Folgen: Wenn die Gletscher schmelzen, steigt der Meeresspiegel. Wie kritisch die Situation ist, hat sich am 14. August 2021 gezeigt: An diesem Tag meldete die am höchsten gelegene Wetterstation Grönlands, dass es regnete. Das hatte es hier seit Beginn der Wetteraufzeichnungen noch nie gegeben – 3216 Meter über dem Meer. Das Eis schmolz auf der gesamten Insel. Auf dem Höhepunkt der Hitzewelle 2021 verlor der Eispanzer gut 12 Milliarden Tonnen, also etwa 12,5 Kubikkilometer, an einem einzigen Tag.

Auf der anderen Seite des Globus, wo über die Hälfte des Süßwassers der Erde im Eis gebunden ist, sieht es ähnlich prekär aus. Allein im Hitzesommer 2019 schmolzen in der Antarktis 168 Milliarden Tonnen, wie die Ice Sheet Mass Balance Intercomparison Exercise (IMBIE) angibt. Nach deren Berechnung haben die Eisschilde von Antarktis und Grönland zwischen 1992 und 2020 insgesamt 7560 Milliarden Tonnen Eis verloren, das entspricht einem Würfel mit einer Kantenlänge von 20 Kilometern. Dadurch ist der Meeresspiegel um 21 Millimeter gestiegen, wobei Grönland den größten Teil, rund 13,5 Millimeter, beigesteuert hat. Noch trägt die Ausdehnung des Wassers durch die Erwärmung

zum Meeresspiegelanstieg mehr bei als die Gletscherschmelze, in diesem Zeitraum waren es rund 35 Millimeter. Das Verhältnis könnte sich jedoch bald umdrehen.

Die Veränderungen betreffen weltweit rund 300 Millionen Menschen: Sie leben in Regionen, die weniger als einen Meter über dem Meeresspiegel liegen. Millionenstädte wie New York oder Djakarta, Shanghai oder Amsterdam sind gefährdet. Dazu kommt, dass mit dem Klimawandel die Stürme an Gewalt zunehmen und die Wellen tiefer ins Land treiben, so dass jeder Zentimeter Meeresspiegelanstieg gewissermaßen doppelt zählt. Es braucht verlässliche Prognosen, wie sich der Meeresspiegel in den kommenden Jahrzehnten und Jahrhunderten verändern wird und wie sich die Eiskappen verhalten werden. Doch dabei gibt es viele Fragezeichen. Vor allem die Schmelzraten der Eisschilde lassen sich nur mit großen Unsicherheiten ermitteln, auch weil lange Datenreihen aus den Kältezeiten der Erde fehlen. Der Weltklimarat IPCC prognostiziert in seinem *Sechsten Sachstandsbericht*, abhängig von der Entwicklung der Treibhaus-

---

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Durch den fortschreitenden Klimawandel schmelzen die Eisschilde Grönlands und der Antarktis. In der Folge wird der Meeresspiegel bis 2100 um bis zu einen Meter ansteigen – heißt es im *Sechsten Sachstandsbericht* des IPCC.

Konventionelle Klimamodelle berücksichtigen die langsamen Veränderungen von Eisschilden noch nicht. Forschende des Max-Planck-Instituts für Meteorologie haben ein Modell entwickelt, mit dem sich die langfristige Dynamik von Eisschilden und die Wechselwirkungen mit dem Klimasystem berechnen lassen.

Im Zusammenspiel von Klima und Eisschilden kann es zu Instabilitäten kommen, jenseits derer ein Eisschild unumkehrbar abschmilzt. Solche Kippunkte werden noch erforscht, für die Westantarktis ist eine solche Schwelle aber möglicherweise schon überschritten.

---

gasemissionen, bis 2100 einen wahrscheinlichen Anstieg von einem halben bis einem Meter im Vergleich zu 1900. Die Vorhersagen berücksichtigen allerdings noch nicht die Rückkopplungen zwischen Eisschilden und Klimasystem. Es könnte also noch schlimmer kommen.

Ein Team um Jason E. Box von der geologischen Forschungsanstalt für Dänemark und Grönland hat hochgerechnet, wie viel Eis allein auf Grönland bis zur Jahrhundertwende verschwindet und wie stark der Meeresspiegel dadurch ansteigen wird, wenn es mit derselben Schmelzrate weitergeht wie in den vergangenen beiden Jahrzehnten. Die Forschenden kamen auf etwa 27 Zentimeter – neun Zentimeter mehr, als der Weltklimarat als Maximum vorhersagt. Nimmt man den Sommer 2012, in dem es eine Rekordschmelze gab, als Maßstab, kommt man gar auf 78 Zentimeter, allein durch Grönland. Die Prognosen berücksichtigen noch nicht die fortschreitende Erwärmung, bei der der Rekordsommer von 2012 bald vielleicht kein Ausreißer nach oben mehr ist.

Ein Team um Marie-Luise Kapsch hat ein Klimamodell so erweitert, dass es die Veränderung der Eisschilde in der Vergangenheit und in der Zukunft berücksichtigt – hier erläutert die Wissenschaftlerin die Ergebnisse für die letzte Kaltzeit des Eiszeitalters.



FOTO: TOM PINGEL FÜR MPG

Um zu verstehen, wie sich Eisschilde und Klima gegenseitig beeinflussen, hilft ein Blick in die letzte Kaltzeit des Eiszeitalters., die umgangssprachlich als letzte Eiszeit bezeichnet wird. Sie begann vor etwa 115 000 Jahren und endete vor etwa 11 500 Jahren. Damals gab es ein Phänomen, das zusätzliche Probleme verursachen kann, sich aber nur schwer in Gleichungen fassen lässt: Das Eis kann instabil werden und zu abrupten Klimaveränderungen führen. Der deutsche Meeresgeologe und Klimatologe Hartmut Heinrich hat schon früh solche Ereignisse aufgespürt. Als er 1988 Sedimente auf dem Grund des Atlantiks untersuchte, stieß er auf Ablagerungen, die offenbar aus Nordamerika stammten. Dafür fand er nur eine vernünftige Erklärung: Eisberge waren auf dem Wasser gedriftet und hatten beim Schmelzen das eingeschlossene Gesteinsmaterial verloren. Das Seltsame dabei: Die Sedimente waren nicht kontinuierlich herabgerieselt, sondern schubweise. Offenbar waren innerhalb kurzer Zeit immer wieder große Mengen Eis vom Laurentidischen Eisschild, der während der letzten Kaltzeit große Teile Nordamerikas bedeckte, ins Meer gerutscht. Diese Perioden nennt man inzwischen Heinrichereignisse. Sie wirkten sich auch auf das Klima in den angrenzenden Regionen aus. Denn das Süßwasser, das dabei in die Ozeane gelangte, änderte Meeresströmungen und damit den Wärmetransport über den Globus. Diese Ereignisse zeigen, dass es schon vor den menschlichen Eingriffen in das Klima Schwellen gab, bei deren Überschreitung massive Klimaveränderungen angestoßen wurden. Auch in Zukunft könnten die Eisschilde instabil werden. Solche Instabilitäten sind in der Öffentlichkeit als Kippunkte bekannt geworden. Ob und, wenn ja, in welchen Teilen des Erdsystems wie dem Amazonasregenwald, den sibirischen Permafrostböden oder den Eisschilden es in der nahen Zukunft Kippunkte geben wird, ist noch unklar. Auch wie sich ihr Überschreiten auswirken könnte, wird in der Klimaforschung noch diskutiert (siehe Interview S. 74).

35

## Kompromiss im Klimamodell

Wenn es darum geht, das künftige Klima zu ermitteln, setzt die Wissenschaft auf Computermodelle, die immer mehr Facetten der Realität wiedergeben. Es liegt nahe, auch die Veränderungen der Eisschilde in die Berechnungen einzubauen. Doch hier stoßen die Rechner an ihre Grenzen. Denn während sich das Klima relativ rasch ändert, verhält sich das Eis ausgesprochen träge. Lange Zeiträume mit komplexen Klimamodellen durchzurechnen überfordert selbst heutige Supercomputer. Zudem lassen sich Veränderungen der Eisschilde und ihre Folgen nur schwer in herkömmliche Klimamodelle einbauen. Bisher hat man sich daher damit begnügt, die Eisschilde in ihrer Form konstant zu belassen. Das schien eine gute Näherung zu sein, weil merkliche Veränderungen Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauern. Doch Beobachtungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass selbst kleine Veränderungen der Eisschilde erhebliche Effekte zumindest auf das lokale Klima haben können.



Die Meteorologin Marie-Luise Kapsch, die am Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie die Rolle von Eisschilden im Klimasystem erforscht, hat deshalb mit Kollegen ein Modell entwickelt, das auch Veränderungen im Eis berücksichtigt. Es ist sowohl räumlich als auch zeitlich gröber aufgelöst als die üblichen Klimamodelle – „ein Kompromiss“, räumt Kapsch ein. Doch mit diesem Modell lassen sich Jahrtausende überblicken. Vor ähnlichen Schwierigkeiten stehen auch Forschende, die möglichen Kippunkten im Erdsystem nachspüren.

## Erderwärmung löst Eisbremse

Wer in die Zukunft schauen will, muss jedenfalls zunächst die Vergangenheit betrachten. Denn ob ein Modell die Wirklichkeit wiedergibt, lässt sich an einem Zeitraum testen, von dem die Entwicklungen halbwegs bekannt sind. Mit dem Max-Planck-Modell ist es sogar gelungen, Heinrichereignisse darzustellen, also den Kollaps von Eisschilden. Dabei war die Ausgangssituation während der letzten Kaltzeit anders als heute. Eine kilometerhohe Eisschicht bedeckte Nordamerika und den Norden Eurasiens, der Meeresspiegel lag mehr als 100 Meter tiefer als heute. Zum Kollaps kam es immer dann, wenn die Last des Eises zu groß wurde, wenn das Eis unter seinem eigenen Gewicht sozusagen in die Knie ging. Die Last führte zu einer Schmelze an der Unterseite der Gletscher, was wie eine Schmierung wirkte – und gewaltige Eisflüsse in Bewegung setzte. Die großen Süßwassermengen, die dann in den Nordatlantik gelangten, kühlten nicht nur den Nordatlantik ab. Auch die atlantische Zirkulation geriet ins Stocken, die Niederschlagsfelder veränderten sich, und der Jetstream nahm einen neuen Verlauf.

Ähnliche Eisverluste wie die Heinrichereignisse sind auch heute noch möglich, sagt Kapsch, allerdings in wesentlich kleinerem Maßstab. Derzeit spielen andere Faktoren die Hauptrolle beim Eis. Es scheint, als würden durch den Klimawandel die Bremsen gelockert, die bisher die Gletscher der Antarktis am Abfließen ins Meer gehindert haben. So schwindet an vielen Stellen das Schelfeis, das als Fortsetzung der Eisschilde ins Meer hinausragt. Das führt zwar nicht zu einem Anstieg des Meeresspiegels, aber die Gletscher werden so nicht mehr zurückgehalten und fließen schneller in den Ozean. Auch der unebene Meeresboden kann bremsend wirken. In der Antarktis kriechen die Gletscher weite Strecken auf dem Meeresboden, doch jeder Buckel hält den Eisfluss auf. Von diesen Bodenwellen gibt es rings um die Antarktis rund 700. Clemens Schannwell, ein Kollege von Kapsch, hat einige davon untersucht.

Ein Ergebnis: Auch diese Bremse verliert an Effizienz. Denn die Gletscher werden dünner und leichter, weil sie schmelzen. So verlieren sie früher den Bodenkontakt und schwimmen über die Bodenunebenheiten.

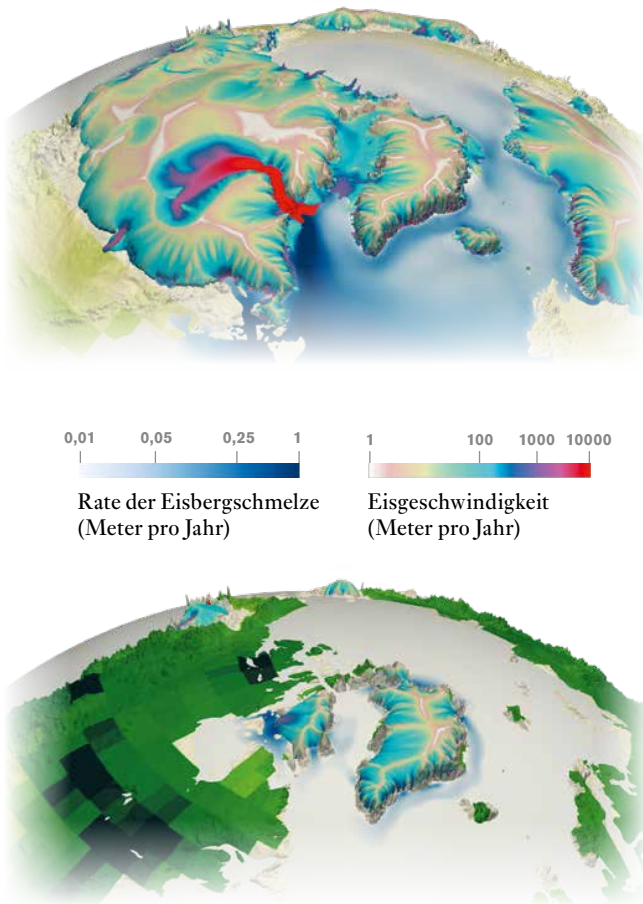
Gleichzeitig steigt der Meeresspiegel und verstärkt den Effekt. Denn dadurch verliert das Eis schon weiter im Landesinneren den Bodenkontakt. Obendrein fällt der Meeresboden an manchen Stellen landeinwärts ab, weil das schwere Eis die Erdkruste eindrückt. So kann das Meer die Gletscher von unten anlagen. Letztlich gelangen so immer mehr Schmelzwasser und Eis in den Ozean, was den Meeresspiegel anhebt und so bewirkt, dass noch mehr Eis verloren geht. „Der Prozess ist anfällig für eine verstärkende Rückkopplung“, sagt Schannwell. Hat der Schmelzprozess einen Schwellenwert überschritten, lässt er sich vielleicht nicht mehr aufhalten. „In der Westantarktis ist der kritische Punkt möglicherweise schon überschritten“, sagt Schannwell. Die Simulation habe aber auch ergeben, dass es Jahrhunderte oder Jahrtausende dauert, bis die Westantarktis eisfrei sein wird. Und sie habe gezeigt, dass die Entwicklung nicht kontinuierlich verläuft, sondern in Schüben.

**„In der Westantarktis ist der kritische Punkt möglicherweise schon überschritten.“**

CLEMENS SCHANNWELL

Auch am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) wird die Entwicklung der Eisschilde erforscht, und zwar mit einem Eismodell. Die Forschenden dort haben sich die letzten Warmzeiten angeschaut, die vergleichbar mit der heutigen Zeit sind. Ein Ergebnis: Steigt die globale Mitteltemperatur um weitere 0,5 Grad, kann es zu einem Kollaps der Eismassen auf der Westantarktis kommen, sagt Torsten Albrecht. Er gehört zur Arbeitsgruppe von Ricarda Winkelmann, die vor Kurzem als Gründungsdirektorin ans Max-Planck-Institut für Geoanthropologie in Jena gewechselt ist. Allerdings seien solche Ergebnisse mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Schon kleine Veränderungen der Anfangsbedingungen führen langfristig zu erheblichen Unterschieden. Auch hat in der Vergangenheit offenbar die Geschwindigkeit der Veränderungen eine Rolle gespielt. Es gebe also die Hoffnung, meint Albrecht, dass die Westantarktis trotz Überschreitens einer Temperaturschwelle, bei der ein Kippunkt zu erwarten ist, stabil bleibe, wenn die Menschen nur schnell genug gegensteuern.

Für Europa ist der grönländische Eisschild noch wichtiger als der in der Antarktis. Auch er könnte instabil werden und komplett verschwinden. Ob und wann dieser Kippunkt droht, lässt sich nur schwer ermitteln.



Kalt- und Warmzeit im Vergleich: Am Höhepunkt der letzten Kaltzeit vor etwa 21 000 Jahren bedeckten Eisschilde große Teile Nordamerikas und Nordeuropas (Grafik oben). Heinrichereignisse, bei denen vom nordamerikanischen Eisschild große Eismengen ins Meer gelangten, sind an der hohen Fließgeschwindigkeit des Eises zu erkennen (rot). Dadurch floss auch viel Schmelzwasser ins Meer (dunkelblau). – Die Grafik unten zeigt die Eisschilde um 1850, also vor dem menschengemachten Klimawandel.

dreimal so schnell wie im globalen Mittel. Ein anderer Mechanismus hängt mit der Höhe der Eisschilde zusammen. In der Höhe ist es kälter als im Tal, das weiß jeder Bergsteiger. Schmilzt das Eis aber, sinkt seine Oberfläche immer tiefer ab, wo höhere Temperaturen herrschen. So verstärkt sich der Tauprozess selbst.

Wer sich mit den Eisschilden beschäftigt, hat es mit all diesen fatalen Zusammenhängen und Abhängigkeiten im Klimasystem zu tun. Meereis und Temperatur, Eisverlust und Meeresspiegelanstieg – ein Zahnrad greift ins andere. Rückkopplungen und Kippunkte gefährden die Stabilität unseres Klimas erheblich. Forschende verschiedener Institute, vor allem des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung, haben untersucht, wie die einzelnen Kippunkte ineinandergreifen – mit beängstigendem Ergebnis. Sie warnen vor einem Dominoeffekt, bei dem ein unumkehrbarer Wandel den nächsten anstößt. Ausgangspunkt für eine solche Kippkaskade könnten die Eisschilde auf Grönland und der Westantarktis sein. Dann ändern sich die Strömungen im Atlantik, die wiederum Auswirkungen auf den Amazonasregenwald haben – und letztlich auf das Klima der gesamten Welt. Aus einer Studie eines Teams um Ricarda Winkelmann geht hervor, dass das Risiko dafür bereits bei einem Temperaturanstieg von 1,5 bis 2 Grad, wie ihn das Pariser Klimaabkommen als Maximum nennt, deutlich zunimmt. Und je weiter die Erderwärmung vorschreitet, desto wahrscheinlicher wird ein solches Szenario. Die Menschheit sollte alles tun, um das zu verhindern.

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

Es drauf ankommen zu lassen ist jedoch riskant. Denn im Nordatlantik sitzt ein Motor, der den vom Golfstrom gespeisten Nordatlantikstrom antreibt – unsere Zentralheizung, die Wärme vom Westatlantik in den Nordosten transportiert. Große Mengen Süßwasser, die vom grönländischen Eisschild in den Nordatlantik fließen, senken dessen Salzgehalt und Dichte. Eine relativ hohe Dichte des nordatlantischen Meerwassers ist aber Voraussetzung dafür, dass letztlich auch der Nordatlantikstrom im Fluss bleibt. Schwächte dieser sich ab oder käme gar zum Erliegen, würde sich das Klima vor allem in Europa fundamental ändern. Langfristig dürfte die Durchschnittstemperatur hier sogar um einige Grad fallen, sollte aus dem Westatlantik keine Wärme mehr zugeführt werden. Wie Messungen eines Teams unter anderem vom PIK zeigen, sind die Umwälzbewegungen im Atlantik schon langsamer geworden. Ein Abbruch der Nordatlantikströmung gilt allerdings auch bei fortschreitendem Klimawandel als sehr unwahrscheinlich.

Schon heute lassen sich hingegen in den hohen Breiten einige Rückkopplungen eindrucksvoll beobachten, die den Klimawandel und den Eisverlust verstärken. Einer dieser Rückkopplungsmechanismen ist die Allianz zwischen Meereisverlust und Temperaturerhöhung: Fehlt das Eis, wird die Energie der Sonne nicht mehr ins All zurückgeworfen, sondern erwärmt das Wasser. Folge: Die Temperaturen steigen im hohen Norden zwei- bis

**GLOSSAR**

*HEINRICHEREIGNIS*  
heißt der schubweise und schnelle Verlust großer Eismassen vom nordamerikanischen Eisschild während der letzten Kaltzeit des Eiszeitalters.

*KIPPPUNKT*  
heißt ein Schwellenwert beispielsweise der Temperatur, bei dessen Überschreiten es im Klimasystem zu unumkehrbaren Prozessen kommt.

Schöpfung und Zerstörung: In dieser Aufnahme des James-Webb-Weltraumteleskops sieht man infrarotes Licht, das hinter den Vorhang des Orionnebels blicken lässt. So werden die Gas- und Staubstrukturen sichtbar, in denen Sterne entstehen. Im linken Bildteil sind auch die Relikte einer Sternexplosion vor 500 bis 1000 Jahren zu erkennen.



# COLDFINGER

TEXT: HELMUT HORNUNG

Kosmische Wolken aus Gas und Staub – das sind die Geburtsstätten von Sternen und Planeten. Um zu verstehen, was genau geschieht, beobachtet die Gruppe um Silvia Spezzano am Garching Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in den Wolken verschiedene Moleküle und simuliert die kosmische Chemie im Labor. Dies gibt Hinweise darauf, wie in Sonnensystemen Bedingungen entstehen, unter denen sich Leben entwickeln kann.

Der Weg zum Geburtsort der Sterne führt über die U-Bahnlinie 6 bis zur Endstation „Garching-Forschungszentrum“. Zu Fuß gelangt man von hier in wenigen Minuten zum Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik. Mit dem Aufzug geht es in den Keller, wo die astrochemischen Labore untergebracht sind. „Hier stellen wir die Bedingungen nach, wie sie in interstellaren Wolken herrschen“, erklärt Silvia Spezzano. Die Chemikerin hat in Bologna studiert, nach einem Jahr in Harvard an der Universität zu Köln promoviert und forscht seit 2015 am Zentrum für astrochemische Studien (Cas) des Max-Planck-Instituts unter Leitung der Direktorin Paola Caselli.

Manche Studienobjekte des Cas lassen sich am Himmel mit bloßem Auge erspähen. So etwa in einer klaren Winternacht im Sternbild Orion, das mit seinen markanten drei Gürtelsternen hoch am südlichen Firmament prangt. Schräg unterhalb, im „Schwertgehänge“, schimmert ein diffuses Nebelchen. In diesem rund 1350 Lichtjahre von der Erde entfernten Gebilde ballen sich gewaltige Wolken aus Wasserstoffgas unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammen und bilden neue Sterne. Was hier aber im Kleinen passiert, wie Sterne wirklich entstehen, das erfährt nur, wer – wie Silvia Spezzano – ganz genau hinsieht. Auf den Fotos großer Teleskope strahlt der Orionnebel prächtig in sattem Rot. Die Ursache dafür sind junge, heiße Sterne, die durch ihre hohe Strahlungsenergie den Wasserstoffatomen, die Sternentstehungsgebiete dominieren, ihre Elektronen zumindest kurzfristig entreißen. Binden sich die Elektronen wieder an die Atomkerne, wird Licht mit einer charakteristischen rötlichen Farbe abgestrahlt.

Eingebettet ist dieser im optischen Licht sichtbare Nebel in einen viel größeren Komplex mit der Bezeichnung OMC-1. Diese Molekülwolke, für die sich Spezzano und ihr Team interessieren, erscheint nur bei längeren Wellenlängen im Infrarotlicht oder im Bereich der Radiostrahlung. Wie alle Dunkelwolken ist sie mit einer Temperatur von wenigen Grad über dem absoluten Nullpunkt (minus 273,15 Grad Celsius) extrem kalt. Sie enthält ungefähr ein Prozent Staub, sehr viel Wasserstoff – und jede Menge andere Moleküle. Diese verraten den Forschenden viel über die Prozesse, die in den Wolken ablaufen. Die Moleküle sind aber auch eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass sich in einem Sonnensystem Leben entwickeln kann. Dabei herrschen im Universum völlig andere Bedingungen als auf der Erde – das gilt auch für Dunkelwolken. „Forschende der Astrochemie müssen sich eine ganz neue Chemie vorstellen“, sagt Spezzano.

Dunkelwolken existieren überall in der Milchstraße. Sie versammeln vergleichsweise viel Materie auf kleinem Raum und verschlucken dadurch wie ein dicker Vorhang das Licht dahinterliegender Sterne. Forschenden im 19. Jahrhundert erschienen sie als „Löcher im Himmel“. Die Bilder, die Max Wolf um die Jahrhundertwende aufgenommen hat, zeigen viele dieser Dunkelwolken. Der Heidelberger Astronom und Pionier der Astrofotografie entwickelte unter anderem ein statistisches Werkzeug, um deren Entfernungen und Größen zu ermitteln.

In den 1960er-Jahren begann man, mit Radioteleskopen tief in solche Wolken zu blicken und dort gezielt nach Molekülen zu suchen; neben Wasserstoff das häufigste ist Kohlenmonoxid. So konnte man erstmals direkt beobachten, wie Dunkelwolken aufgebaut sind und welche Prozesse in ihnen ablaufen, bis am Ende ein neuer Stern entsteht. Heute kennt man in den Wolken ungefähr 300 weitere Arten von Molekülen, zu den komplexesten gehören Fullerene oder Dimethylether. Dass man im Universum eine große Zahl an organischen Molekülen – darunter Amino- und Fettsäuren – entdeckt hat, fasziniert Silvia Spezzano besonders. „Das alles sind Zutaten des Lebens. Und die stecken in den Wolken, aus denen Sterne und Planeten geboren werden, schon drin.“

Um die Moleküle aufzuspüren, setzt die Wissenschaftlerin auf Spektroskopie. Damit kann sie einzelne Substanzen über eine Art Fingerabdruck in der elektromagnetischen Strahlung von Molekülwolken identifizieren. Silvia Spezzano interessiert sich für das Radiolicht bei sehr kurzen Millimeter-Wellenlängen und untersucht es mit Teleskopen wie der 30-Meter-Antenne auf dem Pico del Veleta in der spanischen Sierra Nevada oder dem Observatorium Noema auf dem Plateau de Bure in den französischen Alpen. In den Radiospektren verraten sich die einzelnen Moleküle durch bestimmte Energien, die sie aufgrund ihrer Rotation abstrahlen. Daraus leitet die Wissenschaftlerin unter anderem ab, wie hell eine astronomische Molekülwolke bei welchen Wellenlängen leuchtet. Viele der darin vorkommenden dünnen Linien sind charakteristisch für bekannte Moleküle, die man über einen Onlinekatalog identifizieren kann.

Aus den Linien, also den Fingerabdrücken, lässt sich etwa herauslesen, wie viele Moleküle von einer Sorte in der Wolke vorhanden sind, welche Temperatur das Gas hat, wie dicht es ist und wie es sich bewegt. Die Breite der Spektrallinien verrät Silvia Spezzano, dass ver-

---

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Das Baumaterial von Sternen und Planeten steckt in großen und sehr kalten interstellaren Dunkelwolken, die überwiegend aus Gas und einer Prise Staub bestehen.

In den Dunkelwolken existieren viele Moleküle, deren Analyse Rückschlüsse auf die Entwicklung der Wolken ermöglicht.

Mithilfe von Spektroskopie und Laborexperimenten untersuchen die Forschenden die chemischen Prozesse in Dunkelwolken sowie die Entwicklung von Sternen und Planeten.

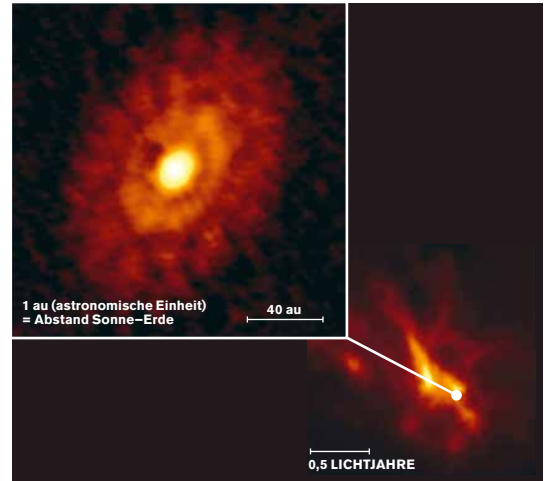
---



schiedene Teile der Wolke mit Geschwindigkeiten von einigen Kilometern pro Sekunde umherwirbeln. Die Dynamik der Moleküle gibt Auskunft darüber, ob die Wolke unter ihrer eigenen Schwerkraft in sich zusammenstürzt oder ob sie vielmehr auseinanderdriftet. Das entscheidet letztlich darüber, ob in der Gas- und Staubwolke ein Stern entsteht oder nicht.

## Kalte Finger

Um das zu verstehen, muss man sich die Prozesse vor Augen führen, die im Detail bei der Sternengeburt ablaufen. Während einfache Modelle von sphärischen, also kugelförmigen Geburtswolken ausgehen, scheint sich die Materie tatsächlich in kleinen Materiefilamenten zu sammeln, die das Gas wie dünne Finger durchziehen. Solche Filamente hat das europäische Weltraumteleskop Herschel vor einigen Jahren beobachtet. Offenbar sind diese Strukturen die eigentlichen Kreißsäle der Sterne. Wie sie zustande kommen, ist noch nicht geklärt. In einem Frühstadium ohne stellaren Kern im Zentrum verteilt sich die Wolke eher weitläufig. Wird an einer Stelle eine kritische Masse überschritten und gewinnt die Gravitation gegenüber dem nach außen wirkenden thermischen Druck der Teilchen die Oberhand, beginnt sie schließlich unter der eigenen Schwerkraft zu kollabieren, die Partikel rasen jetzt aufeinander zu.



**Sternenwiege:** In einer Gaswolke im Sternbild des Schlangenträgers finden sich die dünnen, fingerartigen Filamente aus kaltem molekularem Gas (unten rechts), in denen frisches Material in die dichtesten Regionen (hellgelb) strömt. In manchen dieser Knoten wachsen Sternembryos heran. Der Ausschnitt erscheint am Himmel etwa so groß wie ein Viertel des Vollmonds und wurde mit dem Herschel-Weltraumteleskop im Infrarotlicht aufgenommen. Im Zentrum eines Filaments hat das Alma-Teleskopnetzwerk das Sternensystem IRS 63 abgebildet (oben links), in dessen Gas- und Staubscheibe möglicherweise Planeten heranwachsen.

41

## „Die Zutaten des Lebens stecken in den Wolken schon drin.“

SILVIA SPEZZANO

Wie läuft die Sternengeburt nun ab? Bis aus einer Molekülwolke ein ausgereifter Stern entstanden ist, dauert es nur bis zu rund eine Million Jahre. Im Vergleich zur Lebensdauer eines sonnenartigen Sterns von etwa zehn Milliarden Jahren laufen diese Prozesse also schnell ab. Alles beginnt mit diffusen Wolken aus interstellarem Material. Aufgrund der extrem niedrigen Temperaturen und der Schwerkraft ziehen diese sich zusammen und zerfallen schließlich in noch dichtere Fragmente mit etwa hunderttausend Molekülen pro Kubikzentimeter. Zum Vergleich: Die Erdatmosphäre ist mit zehn Trillionen Molekülen pro Kubikzentimeter um einiges dichter, dafür aber auch deutlich wärmer als interstellares Gas. In den so entstandenen, 0,3 Lichtjahre großen prästellaren Kernen liegen die Temperaturen bei minus 263 Grad Celsius. Werden die Kerne durch die Schwerkraft instabil, kollabieren sie erneut und bilden Protosterne. Diese sind zunächst

tief in eine dicke Hülle aus Gas und Staub eingebettet. Der Staub besteht im Wesentlichen aus winzigen Graphit- und Silikatteilchen. Diese haben lediglich ein Zehntausendstel des Durchmessers von Staubkörnern, wie sie auf der Erde vorkommen. In der Umgebung des Protosterns bilden sich viele Moleküle. Zudem fließt Material von der kühlen Mutterwolke ins Zentrum des Kerns, wo die Materie noch dichter wird und eine Scheibe ausbildet, die den jungen Protostern im Zentrum füttert. Wie dies funktioniert, haben Forschende des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik und des französischen Institut de Radio Astronomie Millimétrique vor einiger Zeit beobachtet. Sie untersuchten mit der Antennenanlage Noema in einer Molekülwolke im Perseus ein protostellares Doppelsystem – Sterne entstehen oft zu mehreren – und beobachteten eine leuchtende Materiebrücke, welche den Außenbereich der Hülle mit der inneren Region verbindet. Dank dieses „Förderbandes“ legt der Sternembryo stetig an Masse, Dichte und Temperatur zu. „Das Molekül, anhand dessen wir das kosmische Förderband entdeckten, hat die Strukturformel HCCCN, besitzt also drei Kohlenstoffatome“, sagt Max-Planck-Direktorin Paola Caselli.

Um Protosterne herum beobachten Astronominen und Astronomen häufig scheibenförmige Regionen, die



theoretischen Modellen zufolge gute Bedingungen für die Geburt von Planeten bieten. Tatsächlich beginnt deren Wachstum laut Forschungsergebnissen schon, während die zentrale Sonne selbst noch heranreift. „Früher dachten wir, dass zuerst die Sterne erwachsen werden und dann quasi Mütter der Planeten sind, die erst später kommen. Aber jetzt sehen wir, dass Protosterne und Planeten sich von Kindesbeinen an gemeinsam wie Geschwister entwickeln“, sagt Dominique Segura-Cox, die damals am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik arbeitete. Ihrer Gruppe gelang am Observatorium Alma in den chilenischen Anden ein detailreiches Bild, das eine protostellare Scheibe mit mehreren Lücken und Staubringen um den weniger als 500 000 Jahre alten Stern IRS 63 zeigt. Dieser ist noch längst nicht fertig – er wird weiterhin Masse aufnehmen. Sobald die Temperatur in seinem Kern auf etwa zehn Millionen Grad gestiegen ist, zündet die Kernfusion, die Wasserstoff in Helium umwandelt. Dann leuchtet im All eine neue Sonne auf.

Um ein Gesamtbild von der Entwicklung der Sterne zu gewinnen, studiert die Gruppe am Garching Cas immer mehrere Wolken in unterschiedlichen Stadien. In den 1980er-Jahren wurden viele solcher Objekte beobachtet und klassifiziert. „Im Weltall existieren sozusagen Kreißsäle mit und ohne Babys, also Dunkelwolken mit und ohne Sterne“, sagt Spezzano. In beiden Fällen registrieren die Forschenden in den Spektren die Fingerabdrücke von mehreren Dutzend verschiedenen Molekülen. Aber es gibt Unterschiede: In manchen Wolken sind Moleküle zu finden, die es in anderen nicht gibt. Auch die Mengen einer Substanz können sich unterscheiden. Der Grund: Die Astronominen und Astronomen beobachten, wie schon gesagt, die Wolken in einer jeweils anderen Entwicklungsphase. Als Beispiel nennt Silvia Spezzano das Methanol: In Wolken ohne Stern sind die Temperaturen im Zentrum niedrig, die Chemie läuft sozusagen auf Eis ab, und gasförmiges Methanol findet sich lediglich in geringen Mengen. Leuchtet in der Wolke hingegen ein Stern, sind die zentralen Temperaturen entsprechend höher. Das Eis löst sich auf – das zuvor gebundene Methanol wird nun freigesetzt und in großen Mengen sicht- und messbar.

## Interstellare Moleküle im Labor

„Wir versuchen, die Teilchen mehrerer Puzzles zu einem Gesamtbild zusammensetzen“, so Spezzano. Daraus ergibt sich ein interessanter Befund: „Ein Protostern strahlt Energie ab und wirkt damit auf seine Umgebung. Eigentlich sollte man meinen, dass dadurch das vorhandene Molekülinventar innerhalb der Wolke komplett vernichtet wird.“ Dies ist jedoch keineswegs der Fall. Vielmehr überleben viele Moleküle die Bestrahlung und werden in die sich entwickelnden Planeten eingebaut. „Das war auch vor rund 4,6 Milliarden Jahren bei der Geburt unseres Planetensystems so.

Deshalb ist ungefähr die Hälfte des Wassers in unseren Gläsern älter als die Sonne“, sagt Spezzano. Der Rest des Wassers ist später entstanden, im Prozess der Stern- und Planetenbildung. Bisweilen tauchen in den Spektren Moleküle auf, die in keinem Katalog verzeichnet sind. „Wir nennen diese zunächst unbekannt Fingerabdrücke deshalb U-Linien, u wie unbekannt“, sagt Spezzano. Im Labor können die Forschenden umgekehrt unter extremen Bedingungen bisher unbekannte Moleküle erzeugen, deren spektrale Signatur vermessen und sie so einer U-Linie zuweisen. Beispielsweise haben Forschende am Cas gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen aus Italien in einer Wolke nahe dem galaktischen Zentrum Propargylinin entdeckt. Das Molekül hat die komplexe chemische Formel  $\text{HCCCHNH}$  und ist äußerst instabil, unter normalen Bedingungen auf der Erde kann man es kaum isolieren. Bei den für das interstellare Medium typischen sehr niedrigen Dichten und Temperaturen hingegen, mit denen das Team um Silvia Spezzano im Labor forscht, bleibt es recht stabil. Diese chemische Spezies spielt eine fundamentale Rolle bei der Bildung von Aminosäuren, die zu den wichtigsten Bestandteilen des Lebens gehören. Auch Spezzanos Studentin Judit Ferrer Asensio ist ein Treffer gelungen. Sie entdeckte deuteriertes Acetaldehyd (für Chemiker:  $\text{CHD}_2\text{CHO}$ )

Warten auf die Messung: Silvia Spezzano diskutiert während eines Experiments mit einem Kollegen. Links im Bild ist ein Teil einer Vakuumkammer zu sehen, in der sie, bei maximal minus 268 Grad Celsius, unter Weltraumbedingungen untersucht, wie Ionen und Moleküle in Sternentstehungsregionen miteinander interagieren.

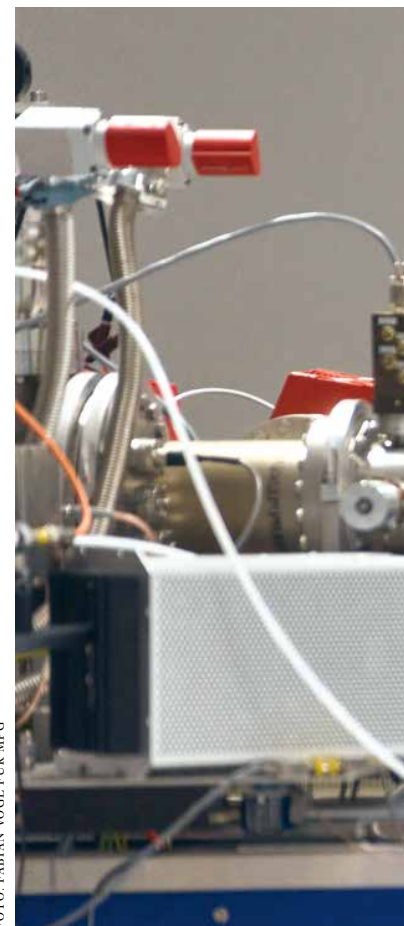


FOTO: FABIAN VOGL, FÜR MPG

# „Die Hälfte des Wassers in unseren Gläsern ist älter als die Sonne.“

SILVIA SPEZZANO

– zunächst im Labor, später dann auch in einer Molekülwolke. Das zeigt, wie wichtig die Laborarbeit ist. Neben Beobachtung und Theorie ist sie die dritte Säule der Forschungen am Zentrum für astrochemische Studien. Ein drei Meter langes Glasrohr ist das Herzstück von Casac, einem von mehreren Spektrometern im Keller des Instituts. Das System untersucht die spektralen Fingerabdrücke von Molekülen in der Gasphase, die auch in einem Plasma innerhalb der Glaszelle erzeugt werden können. Die Spektroskopie erfasst einen Wellenlängenbereich von 0,3 bis 4 Millimetern. In einem anderen Raum steht ein Instrument namens Cas-Ice. Hier bringt eine Eismaschine mit der

Bezeichnung „Coldfinger“ die Moleküle auf eine Temperatur von maximal minus 268 Grad Celsius. Mit Cas-Ice untersuchen die Forschenden im infraroten Teil des Spektrums verschiedene Gemische gefrorener Substanzen. Das Instrument erlaubt unter anderem einen direkten Vergleich mit den Beobachtungen, welche das James-Webb-Teleskop an kosmischem Eis liefert.

Im Jahr 2023 registrierte dieses Weltraumobservatorium in einer Planetenatmosphäre erstmals auch Schwefeldioxid. Die Spektrallinien des Moleküls verbreitern sich, sobald der Druck zunimmt – etwa durch die Anwesenheit von anderen Molekülen wie Wasserstoff oder Wasser, Stickstoff oder Sauerstoff. Im Labor injiziert Spezzanos Team diese Moleküle in eine künstliche Atmosphäre und vergleicht die sich ändernde Linienbreite von Schwefeldioxid mit den Messungen des James-Webb-Teleskops. „Nach dieser Methode werden wir in Zukunft die komplexen Atmosphären von kleineren, erdähnlichen Planeten nachbauen“, sagt Silvia Spezzano. Und auch bei solchen Experimenten geht es um eine fundamentale Frage, die nicht nur die Max-Planck-Forscherin umtreibt, sondern die Astrochemie letztlich leitet: Wie kommt das Leben in die Welt?

[www.mpg.de/podcasts/kaelte](https://www.mpg.de/podcasts/kaelte)



Silke Britzen wandelt zwischen zwei Sphären. Als Wissenschaftlerin analysiert sie am Max-Planck-Institut für Radioastronomie den Inbegriff des Dunklen, denn sie blickt mit beinahe weltumspannenden Teleskopen auf schwarze Löcher. Als Künstlerin erschafft sie Bilder, die von Farben sprühen. Unkonventionell geht sie beim Malen und in der Forschung vor.

TEXT: FINN BROCKERHOFF

Wenn Silke Britzen nachts in den Sternenhimmel schaut, denkt sie nicht an ihre Arbeit – und das, obwohl sie seit fast dreißig Jahren als Astronomin die Rätsel des Weltraums ergründet. „Ich kann den Anblick noch immer einfach genießen und die ästhetische Schönheit bewundern. Die schwarzen Löcher und die kosmischen Jets, an denen ich tagsüber forsche, sind dann ganz weit weg“, erzählt die Wissenschaftlerin vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn.

Für sie liegt die Faszination des Universums in seinen großen, unsichtbaren Geheimnissen – den Dingen, die wortwörtlich im Dunkeln liegen. Der Wunsch, das Weltall zu verstehen, begann für Britzen schon in der frühen Kindheit: „Meine Mutter erzählt gerne, dass ich sie mit Fragen zum Sternenhimmel schon gelöchert habe, bevor ich richtig sprechen konnte.“

Eine der ersten Informationsquellen, mit denen sie ihren wachsenden Wissensdurst stillte, war die US-amerikanische Doku-Serie *Unser Kosmos*, moderiert vom Astronomen Carl Sagan, die 1983 im deutschen Fernsehen ausgestrahlt wurde. „Davon war ich sofort total begeistert. Als ich das gesehen hatte, ging ich zu meiner Physiklehrerin und fragte, ob wir nicht Astronomie im Unterricht behandeln könnten. Sie hat zugestimmt, jedoch unter der Bedingung, dass ich die Unterrichtsstunden selbst vorbereite.“ Also erarbeitete Silke eine zweistündige Unterrichtseinheit über das

Sonnensystem und präsentierte sie ihrer Klasse. „Ich denke, das war für mich der erste kleine Schritt auf dem Weg zur Astronomin.“ Damals hätte sie es sich gewünscht, eine Astronomin oder einen Astronomen stundenlang über das Universum ausfragen zu können. „Die wenigen Astronomiebücher aus der örtlichen Buchhandlung hatte ich schon nach kurzer Zeit allesamt ausgelesen, und Vorträge, in denen Astronomie für Laien verständlich dargestellt wird, gab es damals leider noch nicht.“

Nicht zuletzt deshalb bietet Silke Britzen als Privatdozentin an der Universität Heidelberg seit einigen Jahren die Vorlesung *Schwarze Löcher und die Fragen der modernen Astrophysik* an. Anders als bei einer gewöhnlichen Vorlesung stehen für Britzen hierbei die Fragen der Hörerinnen und Hörer im Vordergrund. Neben den Grundlagen spricht sie zudem über aktuelle astronomische Forschungsprojekte und erzählt aus dem wissenschaftlichen Alltag. Auf diese Weise möchte sie die Arbeit der Astronominnen und Astronomen greifbarer und zugänglicher machen – sowohl für interessierte Laien als auch für junge Menschen, die mit dem Gedanken spielen, das Fach zu studieren oder sogar ihre berufliche Zukunft in der Forschung planen. „Als Kind wäre ich von so einer Veranstaltung begeistert gewesen.“

Schon seit längerer Zeit wuchs – neben der Astronomie – in der damals 15-jährigen Silke aber auch eine weitere große Leidenschaft heran: die Kunst. „Ich bin malend aufgewachsen, und ich habe schon immer gerne mit Farben experimentiert.“ Wenn sie in den Hausaufgaben für den Biologieunterricht beispielsweise Abbildungen von Singvögeln anfertigen sollte, dann nutzte sie die Gelegenheit, um verschiedene künstlerische Techniken auszuprobieren.

→

# BESUCH BEI

---

SILKE  
BRITZEN



FOTO: CHRISTOPH SEELBACH FÜR MPG

45

Fokussiert: Silke Britzen schaut genau hin – sowohl beim Malen als auch in ihrer Forschung.

Der Kunstlehrer erkannte Silkes Talent, gab ihr zusätzlichen Privatunterricht und wollte sie motivieren, Kunst zu studieren. Doch die Faszination für das Weltall ließ sie nicht los: „Ich liebe es zu malen. Aber was kann spannender sein, als das Universum zu erkunden?“ Ein wichtiger Faktor für Silkes Entscheidung gegen ein Kunststudium war das gewaltige Radioteleskop Effelsberg mit seiner 100 Meter großen Schüssel. „Als ich darüber in einem Buch gelesen hatte, wurde es mein großer Traum, mit so einem fantastischen Teleskop zu arbeiten und damit in die Tiefen des Alls zu schauen.“ Ihr Entschluss war gefallen: Sie würde aus ihrer Heimat im rheinland-pfälzischen Irrel nahe der luxemburgischen Grenze nach Bonn ziehen, um an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Physik, Astronomie und Mathematik zu studieren.

Obwohl sie sich gegen sein Fach entschieden hatte, erwies der Lehrer ihrer Entscheidung in der mündlichen Abiturprüfung im Fach Kunst daraufhin sogar seine Reverenz, indem er sie Vincent van Goghs *Sternennacht* und *Zwei Männer in Betrachtung des Mondes* von Caspar David Friedrich analysieren ließ. „Das hat mich damals sehr berührt“, erinnert sich Britzen. Dem Kunstunterricht verdankt sie zudem eine Fähigkeit, die in ihrem Beruf heute eine ganz entscheidende Rolle spielt: „Um malen zu können, muss man sehen lernen.“ Britzens Kunstlehrer ließ sie beispielsweise Äpfel verschiedener Sorten malen – und zwar in einer Weise, dass man hinterher erkennen kann, welcher die Goldrenette und welcher der Boskop ist. Feine Unterschiede in Strukturen, Formen und Farben sehen zu können, ist laut Britzen eine Gabe, die auch in der Astronomie oft benötigt wird: „In den riesigen Datensätzen der Radioteleskope verstecken sich so viele Informationen, dass man sehr genau hinschauen muss, um nichts zu übersehen.“ Zudem könne die Beschäftigung mit der Kunst das Denken öffnen und neue Verknüpfungen schaffen. „Dies bringt einen auf kreative Ideen, die man auch nutzen kann, um in der Wissenschaft weiterzukommen.“

Noch immer also ist die Kunst ein wesentlicher Bestandteil von Silke Britzens Leben. Wann immer sie Zeit hat, malt sie. Am liebsten draußen in der Natur. Dort lässt sie sich von den Farben und Lichtverhältnissen inspirieren, die sie anschließend auf teils abstrakte Art und Weise in ihrer Kunst verarbeitet. „Meine Bilder müssen nicht unbedingt realistisch sein. Mir geht es viel eher darum, Schönes zu schaffen und den Augenblick einzufangen.“ Dafür braucht sie vor allem eins: richtig viel Farbe. „Entscheidend ist für mich, welche Farbaufträge ich benutze. Zum Beispiel habe ich den Hamburger Hafen mehrmals gemalt, um die dortigen Lichteffekte einzufangen.“ Die verschiedenen Techniken, mit denen sie die Öl-, Acryl- und Aquarellfarben für ihre Bilder auf die Leinwand aufträgt,

Kontrastprogramm: Silke Britzen demonstriert im Kontrollraum des Effelsberg-Teleskops, wie ästhetisch Bilder aus Wissenschaft und Kunst sein können. Dabei ist die Aufnahme des schwarzen Lochs M87\* auf dem Bildschirm neben ihr kein Produkt von Kreativität, sondern von Datenanalysen.



FOTO: CHRISTOPH SEELBACH FÜR MPG

erlernte Silke Britzen, indem sie während ihres Physikstudiums in Bonn auch Kurse am Kunstinstitut belegte. „Es hat mir geholfen, den Kopf frei zu bekommen, und war ein wichtiger Ausgleich zur Physik.“

In die Astronomie drang sie unterdessen immer tiefer ein. In ihrer Diplomarbeit beschäftigte sich Britzen am Max-Planck-Institut für Radioastronomie mit einem Beobachtungsverfahren, das als Radiointerferometrie bezeichnet wird. Hierfür richten die Forschenden weit voneinander entfernte Radioteleskope allesamt auf ein astronomisches Objekt. Indem sie die Daten anschließend miteinander verrechnen, rekonstruieren sie ein Bild des Untersuchungsobjekts. „Diese Methode ist zugleich elegant und höchst leistungsfähig. Sie ermöglicht es, mit extrem hoher Auflösung in weit entfernte Galaxien hineinzuschauen, indem man ein virtuelles Radioteleskop von der Größe der Erde erschafft – eine Vorstellung, die ich unglaublich attraktiv fand.“ Später, in ihrer Doktorarbeit, nutzte Britzen diese Beobachtungstechnik, um die Prozesse in den Kernen aktiver Galaxien zu erforschen.

ströme werden beinahe mit Lichtgeschwindigkeit von supermassereichen schwarzen Löchern aus den Zentren von Galaxien herausgeschleudert und können Tausende von Lichtjahren lang sein.

Als Britzen 2008 eine Astronomiekonferenz in München besuchte, die sich mit den Prozessen in der direkten Umgebung dieser Massemonster beschäftigte, verschob sich allerdings der Fokus ihrer Forschung. Zuvor hatte sie sich mit schwarzen Löchern nur befasst, um die Phänomene der Jets besser zu verstehen. „Auf dieser Konferenz ist mir aber klar geworden, dass es viel spannender ist, genau umgekehrt zu denken: also aus den Merkmalen der Jets auf die Eigenschaften der supermassereichen schwarzen Löcher zu schließen, ohne die diese Jets gar nicht existieren könnten.“

Durch diese kleine, aber entscheidende Änderung des Blickwinkels nahm Britzens wissenschaftliche Karriere richtig Fahrt auf. Sie bekam die Chance, von 2017 bis 2019 an der allerersten Aufnahme des Schattens eines schwarzen Lochs mitzuwirken – von der ersten Datennahme mit

## „Ich liebe es zu malen. Aber was kann spannender sein, als das Universum zu erkunden?“

Nachdem sie ihre Dissertation im April 1997 abgeschlossen hatte, ging Silke Britzen als Postdoc für einen Forschungsaufenthalt an das Astronomisch Onderzoek in Nederland, kurz Astron, im niederländischen Dwingeloo. Und auch hier fand sie sehr schnell eine Möglichkeit, ihre künstlerische Ader auszuleben, indem sie sich in Groningen an einem Institut für grafische Techniken anmeldete und dort zusammen mit einer Gruppe niederländischer Künstler verschiedene Drucktechniken erlernte. „Die fertigen Drucke habe ich auf der Hutablage meines VW Scirocco trocknen lassen, während ich zum Astron zurückfuhr.“

In ihrer wissenschaftlichen Arbeit hatte Silke Britzen sich bis zum damaligen Zeitpunkt fast ausschließlich mit der Erforschung kosmischer Jets beschäftigt. Diese gewaltigen Materie-

dem Event Horizon Telescope (EHT) bis zur Veröffentlichung des Bildes. „Als ich hörte, dass mit dem EHT Aufnahmen vom Zentrum der Galaxie Messier 87 in nie da gewesener Auflösung gemacht werden würden, wollte ich sofort dabei sein. Ich hätte es nicht ausgehalten, wenn im Büro neben mir der Kollege mit den Daten gesessen hätte und ich daran nicht hätte mitarbeiten können“, erzählt Britzen lachend.

Obwohl das schwarze Loch (M87\*) im Zentrum von Messier 87 eine Ausdehnung von mehr als 35 Milliarden Kilometern hat, glich das Unterfangen der Forschenden dem Versuch, den hier abgedruckten Buchstaben O aus einer Distanz von 25 000 Kilometern zu fotografieren. „Wir wussten, dass die Auflösung des EHT nur ganz knapp ausreichen würde, um den 54 Millionen Lichtjahre entfernten Schatten des schwarzen

→

Lochs inmitten des Emissionsrings aus leuchtendem Plasma sichtbar zu machen.“ Mehr als 300 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in vier Teams werteten die Daten des EHT unabhängig voneinander aus – darunter auch Silke Britzen. „Wir durften währenddessen nicht miteinander kommunizieren, um uns nicht gegenseitig zu beeinflussen.“ Durch aufwendige Simulationen auf Basis theoretischer Modelle hatten alle Beteiligten zwar bereits eine recht konkrete Vorstellung davon, was im besten Fall auf den Bildern zu sehen sein sollte. „Aber wir konnten ja nicht wissen, ob die Realität mit unseren Erwartungen übereinstimmen würde.“ Als die Forschenden ihre Ergebnisse dann verglichen und auf praktisch allen Bildern im Zentrum tatsächlich ein dunkler Fleck und drum herum der vollständige Emissionsring des umgebenden Plasmas zu sehen waren, waren der Jubel und die Erleichterung riesen-groß, erinnert sich Britzen. „Ich bekomme jetzt noch Gänsehaut, wenn ich daran denke.“

Die Aufnahme des Schattens von M87\* war nach Britzens eigener Aussage das bisher spannendste Projekt ihrer Karriere – doch es gibt ein Phänomen, das sie noch mehr fasziniert: „Mich hat immer interessiert, ob es Galaxien gibt, in deren Zentrum sich zwei supermassereiche schwarze Löcher befinden.“ Erste Hinweise darauf hatte die Wissenschaftlerin bereits in den Ergebnissen ihrer Diplomarbeit gefunden. Ein Indikator für die Existenz solcher binären schwarzen Löcher ist die Tatsache, dass einige der kosmischen Jets gekrümmt sind, erklärt Britzen. „Mit einem einzelnen schwarzen Loch kann man solch einen gekrümmten Jet nur schwer erklären. Inzwischen geht die theoretische Astrophysik deshalb davon aus, dass es in solchen Fällen zwei schwarze Löcher sein müssen, die einander umkreisen.“ In ihrer aktuellen Forschungsarbeit sucht sie daher in immer neuen Galaxien nach Hinweisen auf solche Doppelpacks schwarzer Löcher. „Weil die Daten im Laufe der Zeit immer besser werden und ich immer genauer weiß, wonach ich bei der Auswertung der Daten suchen muss, wird die Arbeit daran immer spannender. An vielen Tagen würde ich das Institut am liebsten gar nicht mehr verlassen.“ Ziel ihrer Arbeit ist es nicht zuletzt, binäre schwarze Löcher zu finden, von denen man, ähnlich wie bei M87\*, eine Schattenaufnahme erzeugen kann. „Das Problem ist, dass alle bisherigen Kandidaten zu weit weg sind, um sie mit dem EHT aufzulösen.“ Britzen hofft, dass sich dies mit der nächsten Generation des Event Horizon Telescope ändern wird. Das next generation EHT, kurz ngEHT, soll eine noch höhere Auflösung erreichen und sogar Serienaufnahmen machen können. 2037 soll zudem

FOTO: CHRISTOPH SEELBACH FÜR MPG



LISA (Laser Interferometer Space Antenna), ein Gravitationswellen-Interferometer, ins All starten, mit dem es möglich werden könnte, die Verschmelzung zweier supermassereicher schwarzer Löcher anhand der entstehenden Gravitationswellen zu detektieren. „Die Annäherung und die Verschmelzung finden aber auf einer Zeitskala von Millionen oder sogar Milliarden Jahren statt.“ Zwei schwarze Löcher ausfindig zu machen, die in den nächsten Jahren miteinander verschmelzen, gleicht daher der Suche nach der Nadel im Heuhaufen. Doch unter anderem gerade deshalb macht Silke Britzen ihre Arbeit so viel Freude. „Mich wochen- und monatelang nach Herzenslust durch die astronomischen Datensätze zu arbeiten und dabei die besten Kandidaten aufzuspüren, ist der Teil meiner Arbeit, an dem ich am meisten Spaß habe.“

Dass Britzen – nach ihrem Forschungsaufenthalt in den Niederlanden und einer Habilitation im Fach





49

Beeindruckende Dimensionen: Hinter Silke Britzen erhebt sich das Radioteleskop Effelsberg – eines der größten Teleskope der Welt. Allein die Schüssel besteht aus einem 1950 Tonnen schweren Metallgerüst und spannt eine Oberfläche auf etwa so groß wie ein Fußballfeld.

Astronomie an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg – schließlich im Oktober 2003 eine feste Stelle am Max-Planck-Institut für Radioastronomie erhielt, freute sie daher sehr. „Die Forschungsbedingungen hier sind einfach super. Derart eigenständig arbeiten zu können und dabei so gut mit der wissenschaftlichen Community vernetzt zu sein, das ist sehr viel wert – besonders weil ich ohne ein festes Team arbeite.“ Stattdessen kooperiert sie für jedes Projekt mit Fachleuten auf der ganzen Welt.

Aktuell findet Silke Britzen so viele Hinweise auf binäre schwarze Löcher wie niemals zuvor. „Ich habe praktisch das beste Forschungsjahr meines Lebens.“ Einfach am Abend um 18 Uhr den Stift fallen zu lassen und nach Hause zu gehen, funktioniert für sie nicht. „Ich nehme die Arbeit in meinem Kopf tatsächlich überallhin mit. Und irgendwann bei einem Spaziergang oder beim Ein-

kaufen fällt mir dann ganz plötzlich eine Lösung ein.“ Nur wenn die Forscherin Pinsel, Farben und Leinwand auspackt, spielt die Wissenschaft zumindest für eine kurze Weile keine Rolle mehr. „Als künstlerische Inspiration sind schwarze Löcher vor schwarzem Hintergrund für mich nicht wirklich geeignet, weil aus ihnen weder Licht noch Informationen entkommen“, sagt Britzen. Daher kann sie Kunst und Wissenschaft beim Malen gut voneinander trennen. „Die Aufnahmen, die wir mit dem Event Horizon Telescope gemacht haben, sind fantastisch. Aber das ist auch alles an Information, was wir haben. Sich einfach vorzustellen, was da sein könnte, und das dann zu malen, wäre aus meiner Sicht unseriös.“ Für ihre Kunst lässt sich Silke Britzen daher viel lieber von Dingen hier auf der Erde inspirieren. „Wenn ich danach wieder ein paar Millionen Lichtjahre weit in den Welt- raum entschwinde, merke ich, dass ich offener bin für neue Ideen.“





FOTO: AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY – IAN TATTERSALL

# ZWEITER BLICK

MAX-PLANCK-INSTITUT  
FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

Die Beziehungen zwischen *Homo sapiens* und Neandertaler reichen viel weiter zurück als bisher angenommen: Aktuelle Studien zeigen, dass sich die beiden Menschenformen schon vor mindestens 200 000 Jahren erstmals begegnet sind, nachdem einige Individuen des *Homo sapiens* den afrikanischen Kontinent verlassen hatten. Als sich der moderne Mensch vor etwa 50 000 Jahren über den Nahen Osten nach Europa und Asien ausbreitete, stieß er erneut auf Neandertaler. In der Folge wurden auch gemeinsame Kinder geboren – und das gar nicht so selten. Bis zu zwei Prozent des Erbguts heutiger Menschen außerhalb Afrikas stammen vom Neandertaler. Die Bilder zeigen das Skelett eines Neandertalers und einen Ausschnitt aus dessen Erbgutsequenz. Am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie arbeiten Paläogenetikerinnen und -genetiker daran, die Analysemethoden für alte DNA stetig zu verbessern. So können sie mittlerweile bis zu 400 000 Jahre altes Erbgut entschlüsseln, von dem nur noch Fragmente übrig sind. Für seine Pionierleistung auf dem Gebiet der Paläogenetik erhielt Institutsdirektor Svante Pääbo im Jahr 2022 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin.

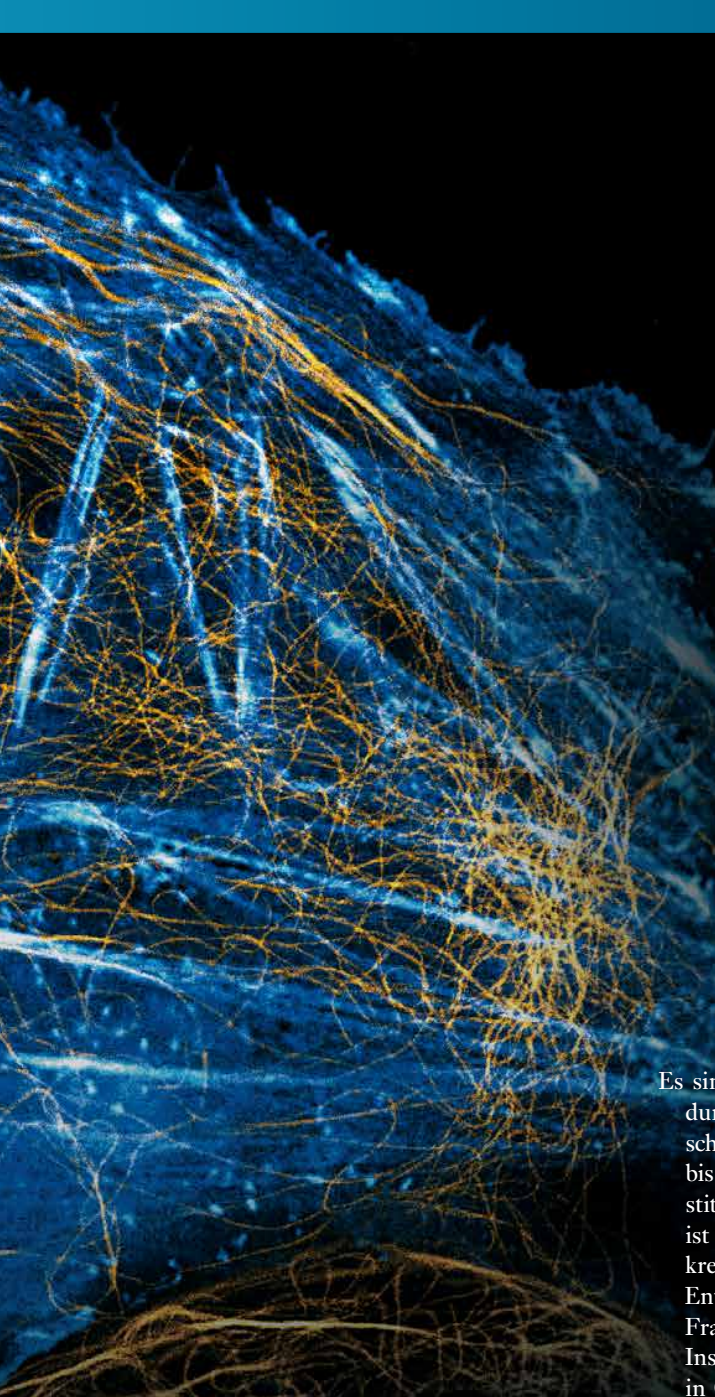
51

# 75 JAHRE

# PATENTE LÖSUNGEN

TEXT: ROLAND WENGENMAYR

Wissenschaftliche Entdeckungen, die für Medizin und Technik vielversprechend sind, in die Anwendung zu bringen, ist das Ziel von Max-Planck-Innovation. Die Agentur für Technologietransfer war weltweit Pionierin darin, Forschende bei der Patentierung und Lizenzierung von Erfindungen sowie der Gründung von Start-ups zu unterstützen. Zu ihrer Geschichte gehören viele Erfolge, ein Wirtschaftskrimi und eine handfeste Krise.



Eine Erfindung für neue Einblicke: Die STED-Mikroskopie bildet Details von Zellen mit einer Auflösung ab, die bislang als unmöglich galt. Hier macht sie die Tubulinfilamente (gelb) und das Aktin (blau) des Zellskeletts besonders detailliert sichtbar und trägt so dazu bei, dessen Funktion etwa bei der Fortbewegung der Zellen besser zu verstehen. Max-Planck-Innovation hat geholfen, die Erfindung zu vermarkten.

Es sind zwei der bedeutendsten Erfindungen aus der Max-Planck-Gesellschaft: Erkenntnissen von Axel Ullrich, bis 2016 Direktor am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried, ist zu verdanken, dass man Nierenkrebs heute überleben kann. Und die Entwicklungen eines Teams um Jens Frahm vom damaligen Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen haben die Zeit, die Patientinnen und Patienten im Magnetresonanztomografen stillliegen müssen, von ein paar Stunden auf Minuten verkürzt. Die beiden Erfindungen trugen nicht nur zum medizinischen Fortschritt bei – die entsprechenden Patente gehören auch zu den bislang lukrativsten in der Geschichte der Max-Planck-Gesellschaft (MPG): Sument® brachte während seiner Laufzeit 160 Millionen Euro ein, die von Frahm mitentwickelte Flash-Technik 155 Millionen Euro.

Dabei sind immer mehr Forschende der MPG an Patenten beteiligt oder gründen Firmen. Allerdings erfordert ein erfolgreicher Technologietransfer professionelles Wissen, denn

internationale Patentanmeldungen und Firmengründungen sind kompliziert. Da hilft die Max-Planck-Innovation GmbH (MI) in München. Dabei ist der Technologietransfer aus der Grundlagenforschung von Max-Planck-Instituten in die Wirtschaft eine ganz besondere Herausforderung: Oft handelt es sich um völlig neue Techniken, und deren Entwicklung bis zur Marktreife gleicht einem Marathon. Eine wissenschaftliche Entdeckung, die zu einem neuen Produkt führen kann, muss patentiert werden, sobald sie gemacht wurde. „Wir sind unter Umständen fünfzehn Jahre von der Marktreife entfernt“, bestätigt Jörn Erselius, Geschäftsführer von MI. Ein Patent lässt sich aber auch nicht einfach später anmelden. Denn gerade in der Grundlagenforschung geht es vor allem darum, Resultate in Fachjournalen zu publizieren. Danach sind sie aber nicht mehr patentierbar. So bleiben bei 20 Jahren Patentlaufzeit oft nur wenige Jahre, in denen die Erfinder und die Max-Planck-Gesellschaft von Lizenzeinnahmen profitieren. Allerdings geht es MI vor allem um den gesellschaftlichen Nut-



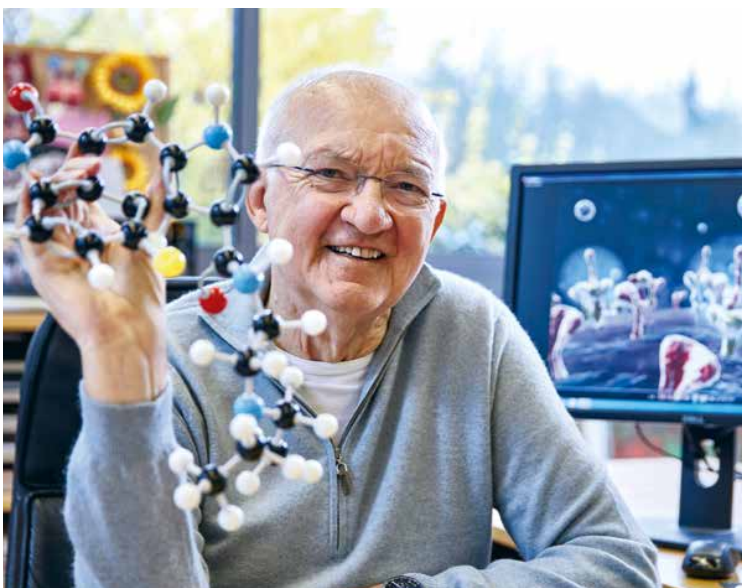


FOTO: HEINZ TROLL

Grundlagenforscher mit Sinn für die Anwendung: Axel Ullrich zeigt ein Modell der Substanz Sunitinib, die manche Krebszellen absterben lässt und auf Basis der Erkenntnisse seiner Gruppe entwickelt wurde. Seit 2006 vermarktet die Firma Pfizer den Wirkstoff in dem Medikament Sutent®.

54

zen, betont Erselius: „Natürlich wollen wir auch für die Max-Planck-Gesellschaft Geld verdienen, aber wichtiger ist uns, was aus den Technologien wird.“

Der gesellschaftliche Gewinn durch Technologietransfer war schon Anfang der 1970er-Jahre gewollt. Damals wurde der Vorläufer von Max-Planck-Innovation, die Garching Instrumente GmbH, gegründet. Jene frühe Phase hat Jaromír Balcar als Gastwissenschaftler am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin erforscht. Im internationalen Vergleich sei die Forschungsorganisation in Sachen Technologietransfer sehr früh dran gewesen, erklärt der Historiker, besonders verglichen mit den USA: „Dort gab es kleine Technologietransfer-Organisationen an einzelnen Universitäten, doch der Boom kam erst mit dem Bayh-Dole-Gesetz.“ Das trat 1980 in den USA in Kraft und räumte den Universitäten das Recht zur Vermarktung ihrer Erfindungen ein.

Die Idee, eine Einrichtung für den Technologietransfer zu gründen, sei am Max-Planck-Institut für Plasmaforschung (IPP) in Garching entstanden, erklärt Balcar. Die Plasmafor-

schung, die auf die Energieerzeugung durch Kernfusion zielt, betritt technisches Neuland und entwickelt dafür Geräte. Das hat Potenzial für die Industrie, weshalb man am IPP seit 1967 eine Vermarktung in Erwägung zog. Auch für die zunächst zögerliche MPG war die Idee einer zentralen Agentur attraktiv, welche die Institute bei Patentierungen unterstützen konnte. Es stellte sich allerdings die Frage, ob es mit der Gemeinnützigkeit der Organisation kompatibel sei, Forschungsergebnisse zu kommerzialisieren. „Das war ein heikler Punkt“, betont Balcar. Deshalb ließ sich die MPG von der Bayerischen Staatsregierung beraten, welche Rechtsform am besten geeignet sei. Am 20. März 1970 wurde schließlich die „Garching Instrumente Gesellschaft zur industriellen Nutzung von Forschungsergebnissen mbH“, kurz GI, gegründet.

Geschäftsführer wurden der vom IPP kommende Physiker Ernst Guilino und der industrieerfahrene Kaufmann Gunther Hoeltz. Die beiden bauten ein Unternehmen mit 35 Mitarbeitenden auf. Es vermarktete nicht allein Patente aus der Max-Planck-Gesellschaft über Lizenzen, sondern fertigte auch selbst Geräte, die an den Instituten entwickelt worden waren.

Die Gerätesparte war den beiden Geschäftsführern sehr wichtig, weil sie sofort Umsatz brachte. Bei den Patenten hingegen dauerte es meistens viele Jahre, bis erste Gelder flossen. Die Außenwirkung von Garching Instrumente in internationalen Fachkreisen war enorm. Bald wurden die Geschäftsführer zu Vorträgen an europäischen und amerikanischen Forschungseinrichtungen eingeladen. „Sie galten als die Pioniere gerade für den Transfer von Erkenntnissen aus der Grundlagenforschung“, erzählt Jaromír Balcar.

Das Gerätegeschäft wurde jedoch so defizitär, dass es Ende der 1970er-Jahre zur Krise kam. Das wäre fast das Ende von Garching Instrumente gewesen, hätte nicht der politische Wind zugunsten des Technologietransfers aus der Wissenschaft geweht. Das damalige Bundesforschungsministerium lobte die Aktivitäten der MPG als „vorbildlich“. Folglich beschloss diese, Garching Instrumente gesundzuschumpfen und als reine Patent- und Lizenzagentur weiterzuführen. Nach der Umstrukturierung

---

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die Agentur für Technologietransfer der Max-Planck-Gesellschaft, die heute Max-Planck-Innovation GmbH heißt, bringt seit 1970 Erkenntnisse und Erfindungen aus Max-Planck-Instituten in die Vermarktung und unterstützt Forschende bei der Patentierung und Lizenzierung von Erfindungen sowie bei der Gründung von Start-ups.

Das Krebsmedikament Sutent®, das auf einer Entdeckung am Max-Planck-Institut für Biochemie beruht, brachte Max-Planck-Innovation mit 160 Millionen Euro die höchsten Lizezeinnahmen, die Flash-Technik für die Verbesserung von MRT-Untersuchungen erlöste 155 Millionen Euro.

warf das seit 1970 stetig anwachsende Portfolio an Patenten und Lizenzen genügend Einkünfte ab, um die Schulden innerhalb weniger Jahre abzubauen. Doch das Geschäft lief nicht immer reibungslos.

Mitte der 1980er-Jahre begann sogar ein regelrechter Wirtschaftskrimi um die eingangs erwähnte Flash-Technik. Die Magnetresonanztomografie (MRT) hatte damals noch das Problem, dass die Patienten und Patientinnen für eine Aufnahme in der Röhre sehr lange stillliegen mussten. Diesen Nachteil überwand das Göttinger Team um den Physiker Jens Frahm. Bei Garching Instrumente half Bernhard Hertel, die Flash-Methode schnellstmöglich zum Patent anzumelden. Wie klug das war, zeigte sich noch im selben Jahr. „Das muss im August 1985 gewesen sein, auf ei-

schaftler an einer Firmengründung beteiligen“, sagt Erselius. So sollten mögliche Interessenkonflikte vermieden werden. Das änderte sich 1988 mit dem Ruf von Axel Ullrich als Direktor ans Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried. Der Biochemiker war ein Pionier bei der Herstellung von gentechnisch erzeugtem Insulin und hatte beim US-Unternehmen Genentech das Verfahren optimiert. Das brachte den Durchbruch zur industriellen Produktion menschlichen Insulins.

Ullrich kannte also das amerikanische Gründungsethos und machte für die Annahme des Rufs zur Bedingung, dass er auch als Max-Planck-Wissenschaftler Firmen gründen und sich daran beteiligen durfte. „Damit war der Bann gebrochen“, sagt Erselius. In Martinsried entdeckte Ullrichs

meinsam mit der New York University in San Francisco das Start-up Sugent. Sugent entwickelte auf Basis von Ullrichs Forschung den Wirkstoff Sunitinib für ein Krebsmedikament, das der Pharmakonzern Pfizer heute als Sutent® vermarktet.

Kurz nach dem Start von Sugent, nämlich 1993, gelang mit Evotec, ebenfalls im Life-Science-Bereich, endlich auch eine Unternehmensgründung in Deutschland. Unterstützt von GI, hat sie vor allem Manfred Eigen, Direktor am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen, vorangetrieben. 1967 hatte er bereits mit 40 Jahren den Nobelpreis für Chemie erhalten. Basis für die Gründung war ein Hochdurchsatzverfahren, das Eigen entwickelt hatte, um in einem evolutionären Prozess effizient unzählige Substanzen auf ihre biologische Wirkung zu testen. Damit lässt sich etwa die Suche nach pharmazeutischen Wirkstoffen beschleunigen. Heute hat Evotec mit Hauptsitz in Hamburg weltweit mehr als 5000 Beschäftigte.

## „Wir haben uns auf die Fahnen geschrieben, Trendsetter im Technologietransfer zu sein.“

JÖRN ERSELIUS

ner Tagung in London“, erinnert sich Hertel: „Dort hatte General Electric das Verfahren bereits in einem Vorführgerät implementiert!“ Jetzt ging ein Patentstreit in den USA und in Europa los, der sieben Jahre dauern sollte. Zur Überraschung des Industriegiganten ließ sich die MPG nicht einschüchtern. Sie nutzte die interne Kompetenz in der Max-Planck-Gesellschaft und gewann so einen ersten Prozess. Danach lenkten die großen Gerätehersteller ein, allen voran General Electric, Philips und Siemens. Ab Mitte der 1990er-Jahre sprudelten dann die Lizenzeinnahmen für die Max-Planck-Gesellschaft.

Bereits einige Jahre zuvor gab es beim Technologietransfer der Organisation einen Paradigmenwechsel. „Bis dahin sollte sich kein Max-Planck-Wissen-

Team eine Klasse sogenannter Kinasen, die unter anderem eine Rolle bei der Blutversorgung von Tumoren spielen. Garching Instrumente kontaktierte zunächst den heute nicht mehr existierenden Pharmariesen Hoechst und andere Pharmafirmen in Deutschland, so Erselius, „aber es wollte keiner kooperieren“. Daher gründete das Team um Ullrich ge-

In den 1990er-Jahren erlebten die Life Sciences einen Boom, damals entfielen etwa 70 Prozent aller Ausgründungen auf dieses Gebiet. Das sagt Ulrich Mahr, als stellvertretender Geschäftsführer von MI für Ausgründungen zuständig. Als die Dotcom-Blase um die Jahrtausendwende platzte, wurde es jedoch schwieriger, Investoren für Biotech-Start-ups zu finden. „Heute deckt dieser Bereich etwa 50 Prozent ab“, sagt Mahr. Andere Start-ups werden beispielsweise aus dem Gebiet der Physik ausgegründet – hier kommen wieder zwei Nobelpreisträger ins Spiel: Theodor Hänsch, Direktor am Max-Planck-Institut für Quanten-

55

→

### DAS FORSCHUNGSPROGRAMM „GESCHICHTE DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT“

Von 2014 bis 2022 rekonstruierten unabhängige Historikerinnen und Historiker die Entwicklung der Max-Planck-Gesellschaft zwischen 1948 und 2002.

Dabei ordneten sie die Geschichte der MPG in die Zeitgeschichte der Bundesrepublik im Zusammenhang europäischer und globaler Entwicklungen ein.

optik in Garching, und Stefan Hell, Direktor am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen, das im Jahr 2022 Teil des neuen Max-Planck-Instituts für Multidisziplinäre Naturwissenschaften wurde.

## Frequenzmessung und Mikroskopietechnik

Theodor Hänsch, der 2005 mit dem Nobelpreis für Physik geehrt wurde, hatte eine Lasertechnik entwickelt, die er Frequenzkamm taufte. Mit dieser Methode lassen sich Lichtfrequenzen optisch messen. Da Licht extrem schnell schwingt, war dies zuvor nicht möglich gewesen. Mit seinen beiden ehemaligen Doktoranden Ronald Holzwarth und Michael Mei gründete Hänsch im Jahr 2001 Menlo Systems in Planegg, um die Frequenzkammtechnik zu vermarkten. Das Unternehmen mit inzwischen beinahe zweihundert Mitarbeitenden hat sich auf dem Markt der ultragenauen Präzisionsmessungen fest etabliert, zu seinen Kunden gehören weltweit zum Beispiel Metrologieinstitute wie die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig.

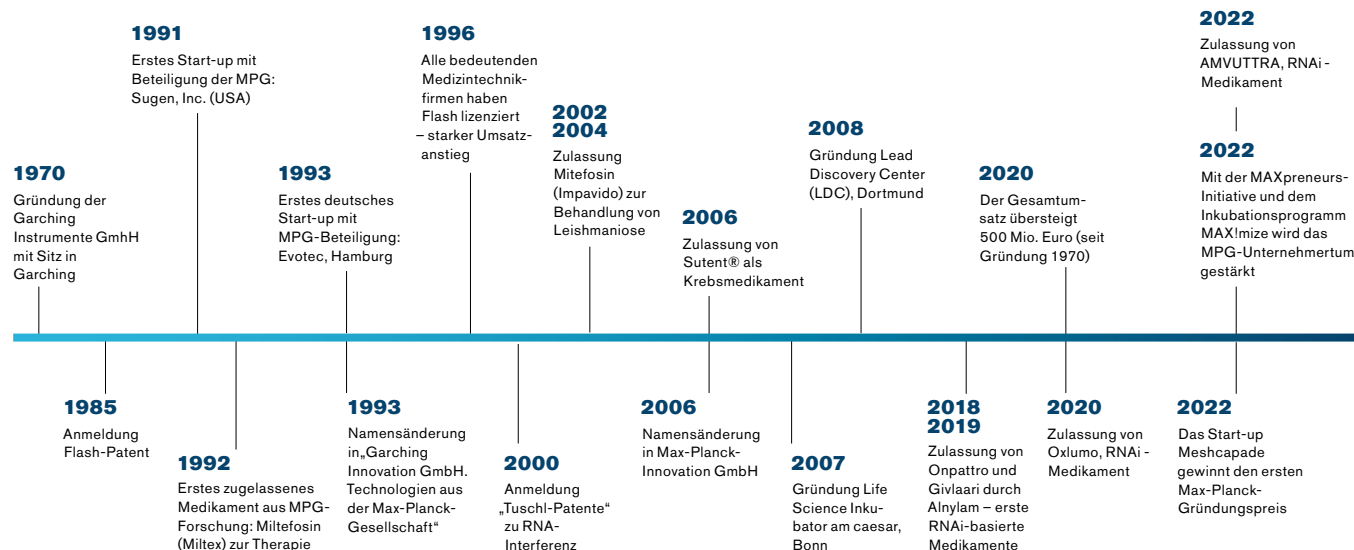
Ein ähnlicher Durchbruch wie Theodor Hänsch ist auch Stefan Hell gelungen – ein Durchbruch sogar, der lange Zeit als unmöglich gegolten hatte: Der Physiker, der 2014 den Nobelpreis für Chemie erhielt, hebelte das Abbesche Beugungslimit aus. Nach diesem von Ernst Abbe 1873 formulierten Gesetz begrenzt die Wellenlänge des Lichts die Auflösung optischer Mikroskope. Und da sie viel größer ist als einzelne Moleküle, sollten sich diese mit Lichtmikroskopen nicht abbilden lassen. In den Biowissenschaften markiert man Moleküle mit fluoreszierenden Farbstoffen, um ihre Aktivität in lebenden Zellen zu verfolgen. Allerdings blieben die Mikroskopbilder wegen des Beugungslimits unscharf. Hell umging das Limit jedoch mit Quantenphysik und speziell geformtem Laserlicht. Mit der Technik gelangen nun Bilder des molekularen Innenlebens von Zellen in bis dahin unerreichter Schärfe. Auf Basis dieser Erfindung gründete Hell mit dem Physiker Gerald Donnert als Geschäftsführer zu Anfang der 2010er-Jahre zwei Unternehmen: Abberior Instruments stellt die mit Lasern arbeitenden Supermikroskope her, Abberior neue Fluoreszenzfarbstoffe. „Die beiden Unternehmen haben sich mit eigenem Gesellschafterkapital in

einem Markt etabliert, in dem sie gegen große Spieler wie Zeiss, Leica oder Olympus antreten mussten“, sagt Ulrich Mahr.

Bis hier ist eine Männerdominanz beim Technologietransfer unverkennbar. Inzwischen ziehen Wissenschaftlerinnen aber nach, etwa die Chemikerin Katharina Landfester, Direktorin am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. Sie hält an die 60 Patente und hat etwa eine raffinierte Methode entwickelt, um winzige Nanokapseln herzustellen. Diese eignen sich zum Beispiel für den genau dosierten, umweltschonenden Einsatz von Fungiziden im Weinbau. Ein Anwendungsgebiet wird auch der zielgerichtete Transport medizinischer Wirkstoffe im Körper sein, hier arbeitet Landfester etwa mit dem Mainzer Impfstoffentwickler Biontech zusammen.

Zweimal wechselte die Agentur für den Technologietransfer in über fünfzig Jahren ihren Namen. 1993 wurde sie in „Garching Innovation GmbH. Technologie aus der Max-Planck-Gesellschaft“ umbenannt, womit das inzwischen irreführende „Instrumente“ aus dem Namen entfernt wurde. 2006 folgte dann die bis heute gültige Umtaufe in Max-Planck-

### MEHR ALS 50 JAHRE MAX-PLANCK-INNOVATION





Innovation GmbH. Damals hatte die MPG ihre Bedenken, in einem Firmennamen aufzutauchen, überwunden. Nun sollte der Technologietransfer unverkennbar mit ihr verbunden sein. Im neuen Jahrtausend markierte 2008 die Gründung des Lead Discovery Center (LDC) in Dortmund einen Meilenstein. Damit reagierten Axel Ullrich und Max-Planck-Innovation darauf, dass es seit 2000 immer schwieriger geworden war, der Pharmaindustrie neue potenzielle Wirkstoffe schmackhaft zu machen. Gemeinsam bauten sie das LDC auf, an dem sich auch die MPG beteiligte. „Lead“ steht für die Leitstruktur eines Wirkstoffs. „Eine solche Substanz ist schon optimiert“, erklärt Erselius, „und hat im Tiermodell die richtige Funktion gezeigt.“ Das senkt die Risiken für potenziell interessierte Pharmakonzerne. Doch diese Strategie allein genügte bald nicht mehr. Folglich begann das Lead Discovery Center, unterstützt von MI, Start-ups auszugründen. Diese Firmen entwickeln die Wirkstoffe bis in die klinischen Phasen, und große Unternehmen können sie so später lizenzieren oder gleich das Start-up aufkaufen.

Der jüngste Meilenstein für MI ist die 2022 gestartete Max!mize-Initiative. Dieses Inkubationsprogramm unter-

stützt Firmengründungen aus den Max-Planck-Instituten heraus noch intensiver als bislang. Forschende können sich hier mit Ideen bewerben, die von MI bis zur Gründung unterstützt werden. Ein wichtiger Aspekt ist dabei der frühe Kontakt mit potenziellen Kunden, schon während die Gründerinnen und Gründer die Geschäftsidee entwickeln. Dieser Realitätscheck entscheidet maßgeblich über den Erfolg. Tatsächlich helfen solche Inkubatoren, die Zahl der Ausgründungen zu steigern. „Vor fünf bis zehn Jahren hatten wir typischerweise fünf bis sieben Ausgründungen pro Jahr, natürlich schwankend“, re-



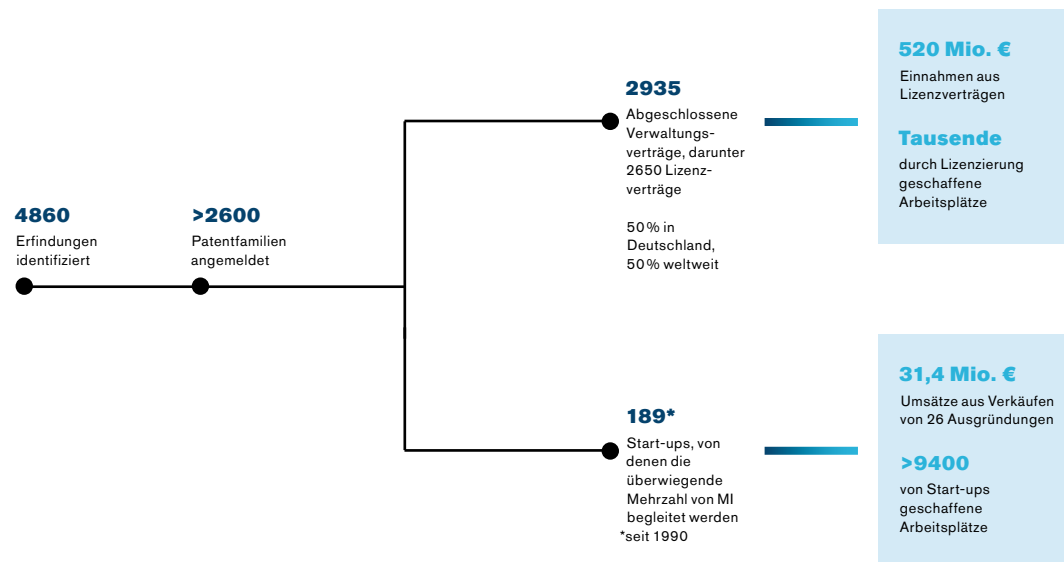
FOTO: KIMBERLY KOBER

sumiert Mahr, „heute sind es eher acht bis zehn, Tendenz steigend.“ Der Großteil der Firmen entsteht in Deutschland, aber einige sehr erfolgreiche Unternehmen wurden in den USA gegründet, wo es deutlich mehr Kapital für Start-ups gibt. „Grob kann man sagen, dass fünfzig Prozent der in der Max-Planck-Gesellschaft entwickelten Technologien ins Ausland lizenziert werden, fünfzig Prozent bleiben hier“, sagt Erselius. „Wir haben uns auf die Fahnen geschrieben, Trendsetter im Technologietransfer in Deutschland zu sein.“ Mit Max!mize hat Max-Planck-Innovation das einmal mehr gezeigt.

57



MAX-PLANCK-INNOVATION IN ZAHLEN



GRAPHIK: GGO NACH MAX-PLANCK-INNOVATION

# E-ANTRIEB FÜRS LEBEN

TEXT: CATARINA PIETSCHMANN

58

Jedes Lebewesen muss Stoffe aus der Umgebung aufnehmen und in Substanzen umwandeln, die es zum Leben braucht. Ohne Stoffwechsel gäbe es folglich kein Leben auf der Erde. Tobias Erb, Direktor am Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie in Marburg, möchte Stoffwechselwege so umprogrammieren, dass sich damit Rohstoffe schonender und effizienter produzieren lassen. Sein jüngster Coup: ein Stoffwechselkreislauf, der mit elektrischem Strom angetrieben wird.

In einer Zelle arbeiten bis zu tausend Enzyme gleichzeitig und stellen zahllose Substanzen parallel her. Die Evolution hat jedoch nicht immer den schnellsten und einfachsten Weg eingeschlagen – viele Stoffwechselprozesse laufen in Etappen ab, bei jedem Schritt entstehen Neben- und Abfallprodukte. Max-Planck-Forscher Tobias Erb möchte die verschlungenen Pfade vereinfachen. Anstelle von aufwendigen und teuren chemischen Großanlagen könnten künftig genetisch veränderte Mikroorganismen und Pflanzen mit neuen Stoffwechsel-

wegen für den Menschen wichtige Rohstoffe produzieren. Wie auf einer Wanderung ist die Routenplanung dafür das A und O: Wo fange ich an, wo will ich hin, und was ist der kürzeste Weg?

Bei der Fotosynthese haben Erb und sein Team einen kürzeren Weg schon gefunden – die besondere Aufmerksamkeit der Forschenden gilt diesem für das Leben auf der Erde so fundamentalen Prozess. Er besteht aus zwei Reaktionszyklen: Im ersten, der „Lichtreaktion“, wird die Energie des Sonnenlichts in chemische Energie umgewandelt. Der zweite, der sogenannte Calvin-Zyklus, nutzt diese Energie dann, um aus dem Kohlendioxid der Umgebung Kohlenhydrate zu bilden. 2016 haben Erb und sein Team den Calvin-Zyklus im Labor nachgebaut. Der künstliche Zyklus aus 17 Enzymen, dem die Forschenden den Namen „CETCH“ gegeben haben, macht dasselbe wie sein natürliches Vorbild: Er wandelt Kohlendioxid in Zuckerverbindungen um, ist

darin allerdings ungefähr doppelt so effektiv. „Außerdem lassen sich mit unserem Stoffwechselweg – je nach Wahl der Enzyme – nicht nur Zucker und Stärke herstellen, sondern auch andere Substanzen wie Antibiotika oder Proteine“, sagt Tobias Erb. Neben dem CETCH-Zyklus haben er und sein Team mittlerweile weitere Alternativen zum Calvin-Kreislauf realisiert, etwa den Hopac- und den Theta-Zyklus, die alle aus Kohlendioxid unterschiedliche Rohstoffe bilden.

Mit solchen maßgeschneiderten Reaktionszyklen könnten also eine Fülle unterschiedlicher Rohstoffe produziert werden. Eine wichtige Zutat fehlt allerdings noch, damit der Enzym-Mix seine Arbeit machen kann: Energie! Für den Calvin-Kreislauf liefert diese die Sonne. In der Lichtreaktion nutzen Enzyme die Energie aus dem Sonnenlicht, um den Treibstoff herzustellen, der die meisten Lebensprozesse am Laufen hält: eine energiereiche chemische Verbindung



# WISSEN AUS

— BIOLOGIE & MEDIZIN

Künstliche Chloroplasten könnten eines Tages Zellen mit Energie und Nahrung versorgen. Forschende haben diese 0,09 Millimeter großen Tröpfchen mit Chloroplastenmembranen von Spinatpflanzen (grün) ausgestattet, die die Lichtreaktion durchführen und einen künstlichen Reaktionszyklus zur Bindung von Kohlendioxid antreiben.

Shanshan Luo und Tobias Erb mit der Reaktionskammer für den AAA-Zyklus.



FOTO: VIRGINIA GEISEL / MPI FÜR TERRISTRISCHE MIKROBIOLOGIE

namens Adenosintriphosphat. Das kurz ATP genannte Molekül stellt die Energie für den Calvin-Zyklus zur Verfügung.

Die Bildung von ATP beinhaltet – wie viele Reaktionszyklen in der Natur – mehrere Zwischenschritte. In der Lichtreaktion wird entlang einer Membran eine elektrochemische Spannung aufgebaut. Diese wird dann für einen Proteinmotor verwendet, der mithilfe mechanischer Energie ATP erzeugt. „Bei der Photosynthese fließt also Strom, allerdings ist die Ladungstrennung an einer Membran sehr umständlich. Meine Mitarbeiterin Shanshan Luo und ich haben uns deshalb gefragt, ob wir unseren künstlichen Stoffwechsel nicht auch direkt mit elektrischer Energie antreiben und so Elektrizität und biologische Systeme verknüpfen könnten“, sagt Erb.

vier Enzymen, die aus unterschiedlichen Mikroorganismen stammen. Das erste Enzym, die Aldehyd Ferredoxin Oxidoreduktase (AOR), ist quasi der „Adapter“: Die Elektronen werden von einer Elektrode auf ein lösliches Trägermolekül übertragen, das sie an die AOR weitergibt. Bei einer Spannung von 0,6 Volt nimmt AOR zwei Elektronen auf. Mit ihnen kann es ein energiearmes Säuremolekül zu einem energiereichen Aldehyd reduzieren. Die drei anderen Enzyme des Zyklus sorgen anschließend für die Rückumwandlung, also die Oxidation des Aldehyds zur Säure. Die dabei frei werdende Energie kann für die Bildung von ATP aus ADP verwendet werden.

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Forschende können heute Stoffwechselzyklen von Zellen im Labor nachbauen und effizienter machen.

Der Cetch-Zyklus ist ein künstlicher Stoffwechselkreislauf, der Kohlendioxid fixieren und in Kohlenhydrate umwandeln kann. Cetch arbeitet deutlich effizienter als der natürlich Calvin-Zyklus und kann auch andere Rohstoffe als Zucker liefern.

Der AAA-Zyklus kann elektrische in biochemische Energie umwandeln. Der Zyklus könnte künftig die Schnittstelle sein zwischen Elektrizität und Biologie und beispielsweise den Cetch-Zyklus zur Kohlendioxid-Fixierung antreiben.

## ATP aus elektrischem Strom

Im Sommer 2023 konnten Erb, Shanshan Luo und das Team Erfolg vermelden: Sie haben einen künstlichen Stoffwechselweg entwickelt, der aus elektrischem Strom den biochemischen Energieträger ATP gewinnt. Der AAA-Zyklus verbindet Elektrizität mit der Energieerzeugung in lebenden Zellen. Der Zyklus besteht aus

Das zentrale Enzym des Zyklus, die AOR, stammt aus dem wenig bekannten Bakterium *Aromatoleum aromaticum*. Forschenden am Zentrum für Synthetische Mikrobiologie der Philipps-Universität Marburg hatten die Erdöl abbauende Mikrobe als Erste erfolgreich im Labor gezüchtet. Dabei haben sie quasi zufällig die AOR entdeckt, die nun als zentraler Energiewandler im AAA-Zyklus dient. „Es war wirklich reiner Zufall, dass die Kolleginnen und Kollegen am Nachbarinstitut genau an dem

Enzym forschten, das wir für den AAA-Zyklus brauchten“, sagt Tobias Erb.

Dass die Forschenden elektrischen Strom direkt in biochemische Energie umwandeln und diese dann für chemische Reaktionen nutzen können, ist ein Durchbruch. Um zu demonstrieren, dass sich damit nicht nur Zuckermoleküle herstellen lassen, haben sie die Komponenten des Zyklus samt den nötigen Bausteinen für ein Protein in ein Reaktionsgefäß gegeben. „Die ganze Maschinerie ruhte, bis der Strom angeschaltet wurde“, berichtet Erb. „Dann trieb der AAA-Zyklus tatsächlich die Produktion des Proteins an.“

Eines Tages könnte der AAA-Kreislauf also die Produktion von Medikamenten und anderen Rohstoffen antreiben. Doch noch gelingt dies nur in kleinen

Mengen. Damit zukünftig auch eine Produktion in großem Maßstab möglich ist, entwickeln die Max-Planck-Forschenden zusammen mit Kolleginnen und Kollegen vom Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik in Stuttgart einen Prototyp, mit dem sie einen Duftstoff herstellen können. Tobias Erb sieht darin „ein Beispiel für die Verzahnung von Grundlagenwissenschaft und angewandter Forschung“.

Wie im Fall des AOR findet Erb geeignete Enzyme oftmals in der Natur. „Wir schauen zunächst, ob es für die Reaktionen, die wir brauchen, in der Natur Vorbilder gibt.“ Vor allem die Mikroorganismen beherrschen eine Fülle unterschiedlichster Stoffwechselfvorgänge. Was den Stoffwechsel angeht, ähneln sich alle mehrzelligen Tiere – vom Wurm bis zum Menschen. In Mikroben laufen dagegen

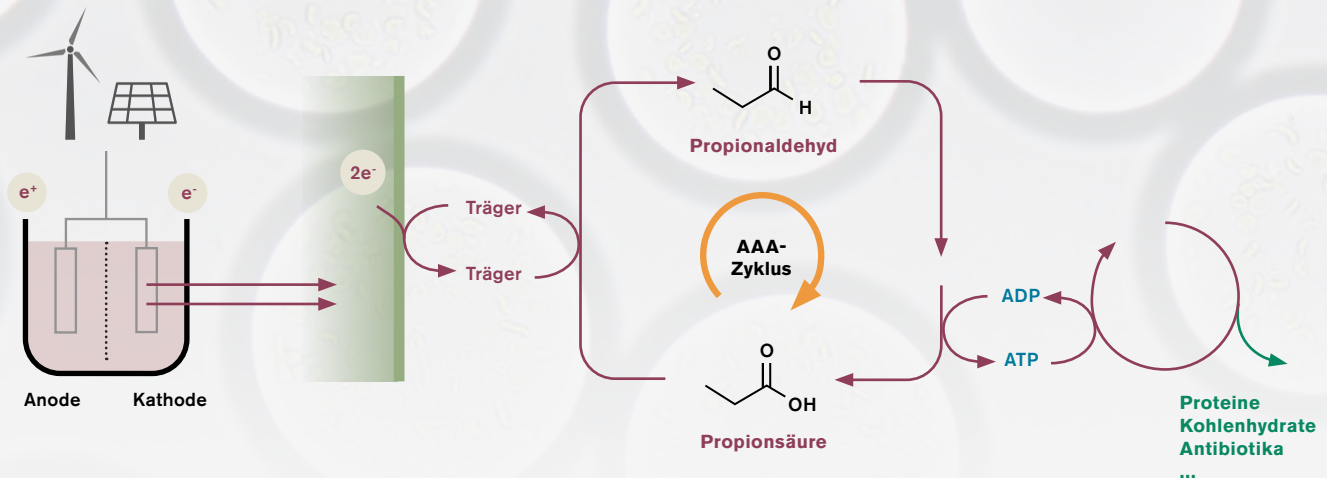
häufig ganz andersartige biochemische Reaktionen ab. Dadurch können sie in extremen Lebensräumen wie etwa der Tiefsee oder im ewigen Eis überleben.

## Enzyme nach Maß

Wenn die Forschenden selbst im Reich der Mikroorganismen nicht fündig werden, greifen sie auf Bestehendes zurück und passen Enzyme, die eine ähnliche Aufgabe erfüllen wie die gesuchten, für ihre Zwecke an. Durch Mutationen lässt sich der Bauplan eines Enzyms so verändern, dass es eine neue Funktion übernehmen kann. Immer wieder kommt es allerdings vor, dass die Forschenden scheinbar alle Zutaten für einen funktionierenden Stoffwechselweg zusammenhaben, die Komponenten sich aber nicht vertragen und einan-



GRAFIK: GCO NACH SHANSAN LUO / MPI FÜR TERRESTRIISCHE MIKROBIOLOGIE



Elektroantrieb für die Zelle: Regenerativ erzeugte Energie stellt die Elektronen bereit, die die Aldehyd Ferredoxin Oxidoreduktase (AOR) im AAA-Zyklus antreiben. Die AOR kann dadurch energiearme Propionsäure in energiereiche Propionaldehyd-Moleküle umwandeln. Drei weitere Enzyme katalysieren die Rückreaktion vom Aldehyd zur Säure. Die dabei frei werdende Energie kann zur Bildung von ATP und schließlich für die Synthese von Rohstoffen genutzt werden.

der hemmen. „Das ist, wie wenn ein Fußballtrainer aus lauter Superstars eine neue Mannschaft formen muss. Wenn die Spieler nicht miteinander harmonieren, wird das Team trotz individueller Klasse nicht erfolgreich sein können“, sagt Tobias Erb. Bis eine perfekte neue Mannschaft auf dem Platz steht, ist also eine Menge Feinschliff erforderlich. Mittlerweile können die Forschenden Enzym-Teams aus bis zu 70 „Spielern“ zu funktionstüchtigen Stoffwechselwegen aufstellen.

## Optimierung statt Neuentwicklung

Trotzdem ist es oft einfacher, ein bestehendes Team zu optimieren, also das natürliche Original eines Stoffwechselzyklus aufzupeppen – zum Beispiel den Calvin-Zyklus der Fotosynthese. Zentrales Molekül im Calvin-Zyklus ist das Enzym Rubisco. Es bindet Kohlendioxid und macht es so für den Stoffwechsel der Pflanze nutz-

bar. „Rubisco arbeitet aber richtig schludrig: Es nimmt nur fünf Kohlendioxidmoleküle pro Sekunde auf – für ein Enzym ist das ziemlich bescheiden. Außerdem macht es auch noch viele Fehler. In jeder fünften Reaktion schnappt es sich statt eines Kohlendioxidmoleküls ein Sauerstoffmolekül“, erklärt Erb. Der Forscher hat aus diesem Grund in seinem Cetch-Zyklus auf Rubisco verzichtet und an dessen Stelle das Enzym Crotonyl-CoA Carboxylase/Reductase gesetzt. Dieses stammt aus einem Purpurbakterium und bindet Kohlendioxid hundertmal schneller als Rubisco.

Mit automatisierten Verfahren untersuchen die Forschenden, wo ein Zyklus noch holpert. Auf diese Weise können sie zeitgleich den Stoffumsatz von 300 Varianten eines Zyklus analysieren. Ein Computer variiert die Konzentrationen der verschiedenen Enzyme und wertet aus, welche der Varianten am effizientesten sind. Diese werden anschließend automatisch weiter optimiert.

Der Cetch-Zyklus funktioniert zwar im Prinzip wie sein natürliches Vorbild während der Fotosynthese, keines seiner 17 Enzyme ist jedoch identisch mit denen, die Pflanzen für die Kohlenstofffixierung im Calvin-Zyklus nutzen. Tobias Erb vergleicht das Vorgehen mit der Erfindung der Luftfahrt: „Durch das Studium von Vögeln hat man gelernt, welchen Gesetzmäßigkeiten das Fliegen folgt und wie ein Flügel funktioniert. Dennoch sehen Flugzeuge nicht aus wie Vögel, sie haben weder Federn, noch schlagen sie mit den Flügeln. In ähnlicher Weise ist der Cetch-Zyklus von seinem biologischen Vorbild inspiriert – er ist aber grundsätzlich anders aufgebaut.“

Aber warum hat die Natur nicht die Zyklen erfunden, die Erb und sein Team sich im Labor ausdenken? Ein Grund ist sicherlich, dass es für das Leben nicht nur auf maximale Ausbeute ankommt, sondern auch auf Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen. Der Cetch-Zyklus läuft prima im Labor, in der Tundra oder im tropischen Regenwald hätte er dagegen sehr wahrscheinlich Probleme. Hinzu kommt, dass die Natur konservativ ist und lieber Bestehendes weiterentwickelt, als komplett neue Wege einzuschlagen.

Erb und sein Team wollen die künstlichen Stoffwechselwege nun in echten Zellen zum Laufen bekommen. Dazu programmieren die Forschenden das Erbgut von Mikroorganismen und einzelligen Algen so um, dass diese die dafür notwendigen Enzyme produzieren können. Der Cetch-Zyklus könnte zum Beispiel in einer Algenzelle die Fotosynthese ankurbeln. Während bei der Fotovoltaik 20 bis 30 Prozent der Sonnenenergie in Strom umgewandelt werden können, nutzen die zelleigenen Chloroplasten lediglich ein Prozent. Den Calvin-Zyklus in absehbarer Zeit komplett durch den künstlichen Cetch-Zyklus zu ersetzen, hält der Forscher allerdings für sehr herausfordernd. „Dazu müssen wir das Herzstück des pflanzlichen Stoffwechsels entfernen – die Konsequenzen für das Funktionieren der Zelle wären



FOTO: THOMAS HARTMANN

Tobias Erb will aus einfachen Molekülen Rohstoffe herstellen. Dafür setzt der Biochemiker auf Stoffwechselkreisläufe nach dem Vorbild der Natur: Die sind effizienter und besser für die Umwelt als traditionelle chemische Herstellungsverfahren.



63

Algen binden Kohlendioxid mit dem Enzym Rubisco. Dieses arbeitet jedoch verhältnismäßig langsam, und es unterlaufen ihm immer wieder Fehler. Tobias Erbs Team experimentiert daher mit anderen Enzymen und Stoffwechselwegen, um die Reaktion effizienter zu machen. Ausgestattet mit künstlichen Reaktionskreisläufen könnten Algenkulturen eines Tages als Bioreaktoren zur Umwandlung von Kohlendioxid in organische Moleküle eingesetzt werden.

enorm. Vielversprechender ist es meiner Meinung nach, zunächst nicht das komplette ‚Betriebssystem‘ auszutauschen, sondern dem natürlichen Prozess mit einer Handvoll optimierter Enzyme auf die Sprünge zu helfen.“ In Algen konnte das Team bereits zeigen, dass diese Form der Optimierung funktioniert.

Tobias Erb sieht die Biologie heute an dem Punkt, an dem die Chemie vor hundert Jahren stand. Damals war die Welt der Atome und Moleküle so weit gut untersucht, dass Forschende nicht nur natürliche Moleküle nach-

bauen, sondern auch völlig neue synthetisieren konnten: Dünger, Medikamente, Kunststoffe und viele andere mehr. Heute verstehen die Forschenden die Stoffkreisläufe in Zellen so gut, dass sie neue entwickeln können. Nun könnte die Biologie die Produktion von der Chemie übernehmen.

Die Fotosynthese könnte dabei für die Zukunft der Menschheit zentral sein. Schließlich würden Nutzpflanzen mit einer effizienteren Fotosynthese aus Kohlendioxid mehr Biomasse bilden und das Treibhausgas so der

Atmosphäre entziehen. Dadurch ließen sich höhere Ernten erzielen und nebenbei noch ein Beitrag für den Klimaschutz leisten. „Beides brauchen wir dringender denn je: Im Jahr 2050 werden rund zehn Milliarden Menschen auf unserem Planeten leben. Um sie alle ernähren zu können, muss neben der Umstellung der Ernährung und der Verringerung der Lebensmittelverschwendung auch die Produktivität der Landwirtschaft erhöht werden. Und wenn wir dabei gleichzeitig etwas zum Klimaschutz beitragen können – umso besser“, sagt Tobias Erb.



Hoch hinaus: Das  
Wasserkraftwerk Gilgel  
Gibe III nutzt die Kraft  
des Omo in Äthiopien.  
Mit 243 Meter Höhe  
zählt die Talsperre zu den  
höchsten Afrikas.





# STREITSACHE NATUR

TEXT: MICHAELA HUTTERER

Bergbau, Staudämme, Infrastruktur: Wenn der Fortschritt Lebensraum und Kultur lokaler und indigener Gemeinschaften bedroht, scheinen Umweltrechte ein Ausweg. Doch was nützen Menschenrechte auf eine gesunde Umwelt und Eigenrechte der Natur in der Praxis? Ein juristisch-ethnologisches Team des Max-Planck-Instituts für ethnologische Forschung findet Antworten in der Mongolei, in Äthiopien und im Amazonasgebiet.

Enkhtuya wirft einen prüfenden Blick auf die lange Rille im Boden. Eine tiefe Furche, gespickt mit Spikes, hat er um seine Jurte und sein Winterlager gezogen, hineingegraben in die karge, hügelige Weite der Provinz Südgobi in der Mongolei. Am Rand des Grabens ein Turm aus sechs verschlissenen Gummireifen, mit Steinen beschwert, wie ein Wächter, der allen, die vorbeikommen, entgegenruft: Halt, nicht weiter, das ist Enkhtuyas Land! Für den Viehhirten sind dies Zeichen des Widerstands gegen die Übermacht mongolischer Bergbauunternehmen wie Erdenes Tavan Tolgoi in der Südgobi, einer Region, die seit Jahrtausenden keine Grenzen brauchte.

Doch seit Lastwagen um Lastwagen Kohle, Kupfer und andere Metalle zur nahen chinesischen Grenze abtransportieren, hat sich das Leben verändert. „Ohne Grenze fahren die Lastwagen mein Vieh tot und zerstören das Weideland“, sagt der Hirte. Wenige Hundert Kilometer weiter hat auch Uranmandakh einen Zaun um ihr Hab und Gut gebaut – aus alten Metallplatten, Schrott und Paletten. „Die Bergbauunternehmen kommen eher für die Schäden auf, wenn wir einen Zaun vorweisen können“, berichtet die Hirtin, die versucht, sich an die neue Situation anzupassen.

„So geht es vielen Nomaden, denen ich bei meinen Feldforschungen in der Südgobi begegne“, sagt Bayar Dashpurev, Jurist und Doktorand am Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung in Halle. „Seit die Mongolei die Gewinnung und den Export von Bodenschätzen zu ihrem wichtigsten Wirtschaftszweig erklärt hat, verlieren die Hirten wertvolles Weideland und den Zugang zu den ohnehin knappen Wasserquellen, außerdem schneiden kilometerlange Lastwagen-

konvois traditionelle Wege ab“, berichtet Bayar. Von September 2021 bis Februar 2022 hat der Wissenschaftler an drei Orten in der Provinz Südgobi untersucht, auf welche Weise sich die Menschen gegen die Umweltaggressoren zur Wehr setzen.

Seine Erkenntnis: Sie tun es kaum – zumindest nicht juristisch. Es gibt keine Gerichtsverfahren gegen erteilte Bergbaugenehmigungen oder Klagen auf Schadenersatz. Dabei hat die Mongolei bereits 1992 Umweltrechte in der Verfassung verankert, die Vorschriften und Standards sind streng. „Die Verfassung kennt ein Recht auf eine intakte Umwelt“, sagt Bayar. Jeder Bürger, jede Bürgerin habe „das Recht auf eine gesunde und sichere Umwelt und auf Schutz vor Verschmutzung und ökologischem Ungleichgewicht“. Es sei Aufgabe der Regierung, Maßnahmen zum Schutz der Natur sowie zur nachhaltigen Nutzung und zur Wiederherstellung der natürlichen Ressourcen zu ergreifen.

Doch in den Weiten der Südgobi scheint all das nicht zu gelten. Die Verschmut-

65



zung und die Zerstörung der Umwelt schreiten voran, die Bergbaulizenzen werden erweitert, und das nomadische Leben, das seit vielen Generationen den Kern des ländlichen Lebens ausmachte, schwindet zusehends.

Dabei gilt diese Lebensweise als besonders ressourcenschonend. „Laut Verfassung sind jede Mongolin und jeder Mongole verpflichtet, die Umwelt zu schützen. Nomaden praktizieren dies seit Jahrtausenden aus ihrer Tradition heraus“, berichtet Bayar und zitiert eine alte Lebensregel: „Verlasse alles so, wie du es im nächsten Jahr wieder vorfinden möchtest.“ Doch die Menschen setzen sich nicht mehr aktiv dafür ein.

Warum? Ethnografische Studien geben Aufschluss. In Interviews, Beobachtungen und Recherchen prüft Bayar seine Thesen und erkennt Muster. „Es gibt viele Gründe, warum die Menschen die Umstände zu akzeptieren scheinen“, sagt er. Unwissenheit sei bestimmt ein Grund, aber nicht der einzige. Dezentralisierung? Mit Sicherheit. „Viele Hirten sagten mir, dass sie nicht zu Demonstrationen gegen Bergbauunternehmen gehen, weil sie ihr Vieh nicht über eine Woche

allein lassen können“, so der Forscher. Genau deshalb scheuten viele auch Gerichtsverfahren in weit entfernten Zentren. Zugleich beobachtet Bayar eine tiefe Spaltung in der Gesellschaft vor Ort. Ansässige und Zugezogene, Nomaden außerhalb und innerhalb der von Bergbauunternehmen abgesteckten Gebiete sowie Hirten mit eigenen Herden und Viehbesitzer, die Hirten für sich arbeiten lassen, finden nicht zu einem Konsens oder gar zu einer gemeinsamen Strategie der Prozessführung.

Gleichzeitig ist die Rechtsposition der Hirten schwach. Das mongolische Recht gewährt Nomaden kein Privateigentum an Grund und Boden in der Gobi. „Alles gehört allen, die Weiden sind öffentliches Land“, berichtet Bayar. „Bergbauunternehmen haben jedoch umfassende Nutzungsrechte zum Abbau von Rohstoffen. Wie aber der Ausgleich und das Miteinander von Bergbau und Anwohnern erfolgen sollen, das ist rechtlich nicht geklärt“, sagt er. Und doch gibt es praktische Lösungen. Die Gemeinschaften haben Wege gefunden, um ihre Existenz zu sichern: aushandeln statt klagen. In der Südgorbi ist es ein Handel, der nur selten vor Gericht, sondern vor allem

*Links* Augenschein: Gezahagn Belewa Akudongole blickt auf die Reste seines Hofes im unteren Omo-Tal in Äthiopien.

*Rechts* Selbsthilfe: Mit einem tiefen Graben um seine Jurte schützt Enkhtuya sich vor den Lastwagenkonvois in der mongolischen Provinz Südgorbi.



in den Hallen der Minengesellschaften stattfindet: Anwohner feilschen um Entschädigungen für zerstörtes Weideland, Zugangsrechte oder Infrastruktur – und berufen sich dabei durchaus auf Umweltrechte, um ihre persönliche Situation zu verbessern.

„Früher gab es keine Straßen, keine Schulen, keinen Strom, kein Internet. All das übernehmen jetzt die Berg-



Bestandsaufnahme: Forscher Abduletif Kedir Idris notiert, was der Gemeindeführer über den Damm im Omo-Tal berichtet. Arez Akurkori Loyalm (auf der Matte) ist einer der wenigen Dassanech, die den Staudamm besichtigt haben. Gezahagn (im gelben Hemd) übersetzt.



FOTO: ABDULETIF KEDIR IDRIS / MPI FÜR ETHNOLOGISCHE FORSCHUNG



FOTO: BAYAR DASHPUREV / MPI FÜR ETHNOLOGISCHE FORSCHUNG

bauunternehmen“, sagt Bayar. Mit dem Rohstoffabbau entwickelt sich Infrastruktur in der Region – durch Tausch: Weide gegen Strom, Staub gegen Geld, Dürre gegen Job – nomadische Kultur gegen modernes Leben. Und dabei tun die Nomaden das, was sie schon lange Zeit praktizieren: Sie passen sich an – an die Natur und ihren Aggressor. Sie schaffen sichtbare Zeichen von Eigentum, wo keines ist, und verhandeln ihre Zukunft – vielfach auf Kosten ihrer kulturellen Identität, so der Forscher: „Viele ziehen absichtlich in die Nähe der emissionsträchtigen Abbaugelände, um ein neues Leben zu beginnen.“

Welche schädlichen Auswirkungen staatliche Entwicklungsprogramme auf die lokale Bevölkerung haben können, mussten auch die Dassanech im unteren Omo-Tal in Äthiopien erfahren. Seit die Regierung vor über zehn Jahren den Staudamm und das Wasserkraftwerk Gibe III in rund 400 Kilometern Entfernung bauen ließ, haben rund 80 000 Angehörige der Gemeinschaft ihre Lebensgrundlage verloren. Wie andere indigene Gruppen lebten die Dassanech in Symbiose mit dem Fluss im Südwesten Äthiopiens, der im Hochland entspringt und nach 760 Kilometern in den Turkana-See in Kenia mündet. Die Menschen im Omo-Tal, einer der regenärmsten Regionen der Welt, nutzten den lebenspendenden Zyklus von Über-

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Viele Verfassungen kennen Menschenrechte auf eine gesunde und saubere Umwelt. Sie verheißen Schutz vor Umwelteingriffen.

In der Praxis kommt dieser Schutz nicht immer bei den Betroffenen an und berücksichtigt oftmals nicht die lokalen Gegebenheiten.

Neue Umweltrechte wie etwa die Eigenrechte der Natur können den Naturschutz stärken, lassen sich aber kaum unabhängig vom Menschen erfassen. Differenzierung zählt.

schwemmung in der Regenzeit und Hitze. Sie zogen den fruchtbaren Böden im abtrocknenden Flussbett hinterher, um eine besondere Form von Ackerbau und Viehzucht in Feuchtgebieten zu betreiben.

„Der Bau des Gibe-III-Staudamms unterbrach die Strömung; der Schlick, der die Böden fruchtbar gemacht hatte, blieb mehr als drei Jahre aus“, berichtet Abduletif Kedir Idris, Doktorand am Max-Planck-Institut in Halle. Der Jurist untersucht, wie sich der 2014 offiziell eingeweihte Stau-

damm auf die Lebenswirklichkeit der Dassanech auswirkt und was diese tun, um ihren Lebensraum zu schützen. Auffällig: Auch hier gibt es keine Gerichtsverfahren, keine Klagen. Dabei kennt die äthiopische Verfassung seit 1995 das „Recht auf eine saubere und gesunde Umwelt“, berichtet Idris. Aber es kann weder lokal noch national durchgesetzt werden.

67

## Die hohe Hemmschwelle

„Kein Wunder“, sagt Idris, der auch Dozent für öffentliches Recht und Menschenrechte an der Universität Addis Abeba ist: „Die Hemmschwelle, gegen den Staat als wichtigsten Wirtschaftsakteur und Betreiber zahlreicher Infrastrukturprojekte rechtlich vorzugehen, ist in einem Land mit autoritärer politischer Kultur sehr hoch. Rechtsstaatlichkeit ist hier keine Selbstverständlichkeit“, erklärt der Jurist. „Daher vertrauen die Menschen nicht darauf, dass sie bei Umweltkonflikten zu einem gerechten Ergebnis kommen.“

Für Idris liegt das vor allem an der Justiz, die als nicht unabhängig wahrgenommen wird, aber auch am Verständnis, das die Gesellschaft vom Recht und von seiner Durchsetzung hat. „Staatliche Behörden kontrollieren einander



kaum“, berichtet der Wissenschaftler. So verhängte die Umweltschutzkommission beispielsweise gegen einen staatlichen Betreiber bei Verstößen keine Bußgelder. Im Falle des Baus von Gibe III blieben wichtige Mittel zur Durchsetzung von Umweltrechten außen vor. „Die Befugnis, die Umweltverträglichkeitsprüfung zu überwachen und den Bau des Staudamms zu genehmigen, wurde an die Behörde delegiert, die für die Planung und den Betrieb der Stromerzeugung zuständig ist – was einen klaren Interessenkonflikt darstellt.“

Mangelnde Kontrolle, unzureichendes rechtliches Gehör und bewusste Fehlinformationen entdeckte Idris in Gesprächen mit Betroffenen, lokalen Behörden, Betreibern, Experten und Regierungsbeamten. So ließ man die Dassanech glauben, der Bau beeinträchtigt ihre Vieh- und Landwirtschaft nicht. Man versprach ihnen Zugang zu Elektrizität, sodass sie mit Elektropumpen die Böden wässern könnten. Doch die Dassanech erhalten bis heute keinen Strom aus dem Wasserkraftwerk. „Der Strom wird nach Kenia, Dschibuti und in den Sudan exportiert“, sagt Idris. Den Dassanech habe der Betreiber stattdessen dieselbetriebene Wasserpumpen zur Verfügung gestellt, die jedoch schon nach kurzer Zeit ausfielen – mit fatalen Folgen für Vieh und Mensch.

„Sie müssen verstehen, wie wichtig das Vieh für diese Gemeinschaft ist. Es ist nicht nur eine Form der Landwirtschaft, sondern auch eine Quelle der Identität. In erster Linie bestimmen Rinder das tägliche Leben; ihr Besitz ermöglicht es den Menschen zu heiraten; viele Lebensereignisse, von der Geburt bis zum Tod, werden mit Rindern gefeiert, als Opfer, im Tausch oder als Geschenk. Wenn ein Mann kein Vieh mehr besitzt, hat er nach Stammesrecht keinen Anspruch auf Bestattungsriten.“

Jahrelang warteten die Gemeinschaften auf Wasser. Doch als die Betreiber große Mengen Wasser plötzlich abließen, fluteten sie die kargen Äcker und vernichteten die Ernte. Vier Jahre lang standen einige der fruchtbarsten Gebiete der Dassanech unter

Wasser. „Die Menschen hungern und leben nun von den Almosen verschiedener Hilfsorganisationen und der Regierung.“ Das Recht in der Verfassung, es nützt den Dassanech nichts.

## Recht braucht Strukturen

Dass recht haben und recht bekommen, zweierlei sind, ist nicht überraschend für Dirk Hanschel, Fellow am Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung und zugleich Professor für Verfassungs- und internationales Recht an der Universität Halle. Als Leiter der Arbeitsgruppe „Umweltrechte im kulturellen Kontext“ betreut er die Feldforschung in der Mongolei und in Äthiopien. „Rechtlicher Umweltschutz bedeutet nicht, dass der Gesetzgeber einfach Normen aufstellt und hofft, dass diese möglichst allen Bevölkerungsschichten und -gruppen gerecht werden. Unsere Feldstudien zeigen: Es müssen vielfach erst die materiellen und institutionellen Grundvoraussetzungen geschaffen werden, bevor solche Rechte wirksam werden können.“ Hanschel sieht starke Verwerfungen zwischen dem großen Versprechen neuer Umweltrechte und so manchen Realitäten in von Umweltzerstörung besonders betroffenen Gebieten. „Häufig bleiben verfassungsrechtliche Versprechen eher theoretisch, und die tatsächlichen Bedürfnisse der von Umweltzerstörung besonders betroffenen Menschen werden nicht ausreichend berücksichtigt“, sagt der Wissenschaftler.

Gerade deshalb wählte sein juristisch-ethnologisches Team mehrere Orte im sogenannten Globalen Süden, die von schweren Umwelteingriffen betroffen sind. Mehrere Monate lang untersuchten sie, wie die Menschen auf die Einflüsse reagieren, welche Art von Protest sie zeigen, wie ein Ausgleich versucht wird und welche Funktion das Recht dort erfüllt. Mithilfe ethnografischer Methoden konnten die Forschenden tiefer in die Problematik eindringen und Meinungen, Verhaltensweisen und soziale Regeln entdecken. Spielen Umwelt-

rechte eine Rolle, wo Menschen Schutz gegen Umwtaggressoren suchen – auch gegenüber dem Staat? Dienen diese Rechte dem Menschen oder eher der positiven Wahrnehmung in der internationalen Gemeinschaft, bei Investoren oder potenziellen Geldgebern?

„In Zeiten, in denen der Umweltschutz Gerichte in aller Welt beschäftigt, ist es besonders wichtig, genau hinzuschauen, unter welchen Umständen das Recht entsteht und wie es in der Praxis angewendet wird“, sagt Hanschel. Ein entsprechendes, von der Volkswagenstiftung gefördertes Projekt führt ihn zu Jahresbeginn nach Ecuador, wo Gerichte und Verfassung eine neue Form von Umweltstandards geschaffen haben. Ecuador räumt nicht nur den von geplanten Bergbau- oder Rodungsprojekten Betroffenen Rechte ein, sondern auch der Natur selbst, genannt Pacha Mama oder Mutter Erde – ähnlich dem rechtlichen Konstrukt eines Unternehmens,

Export durch die Wüste: Lastwagenkonvois wie diese transportieren Kohle ins benachbarte China und zerschneiden ursprüngliches Weideland in der Mongolei.



FOTO: REUTERS/B. RENTSENDORJ

das sich in seinen Rechten verletzt sieht und deshalb eigenständig klagen kann. Der Mensch vertritt treuhänderisch die Belange der Natur vor Gericht.

Im Fall von Los Cedros, einem Nebelwald nahe der Hauptstadt Quito, hat das Verfassungsgericht die Rechte der Natur genutzt, um die Rechtspersönlichkeit des Waldes anzuerkennen. Das Ziel ist, jenseits der Menschenrechte für die von Bergbauaktivitäten betroffenen Menschen einen zusätzlichen Schutz zu etablieren. In Kolumbien wird zwar die Rechtspersönlichkeit der Natur in der Verfassung nicht erwähnt. Dennoch haben die Richter einem Fluss eigene Rechte zugesprochen. „Im Fall des Rio Atrato hat Kolumbiens Oberster Gerichtshof entschieden, dass der Staat konkrete Schutzmaßnahmen ergreifen muss; und er hat den Staat und die im Atrato-Becken lebenden ethnischen Gemeinschaften zu *guardianes*, zu Hütern des Flusses, ernannt“,

berichtet Annette Mehlhorn, Mitglied der Forschungsgruppe und Postdoc am Institut. Inzwischen sind weltweit zahlreiche Flüsse als Rechts-subjekte anerkannt worden – beispielsweise der kolumbianische Teil des Amazonas, der Rio Cauca und der Rio Magdalena. In Neuseeland erhielt 2017 der Whanganui River nach einem Vertrag zwischen den Maori und der Regierung den Status eines Rechts-subjekts. Ebenso gelten der Turag River in Bangladesch und in Pennsylvania, USA, das Ökosystem in Tamaqua Borough als Rechtssubjekte.

„Diese vielen Urteile zeigen, dass die Idee der Rechte der Natur an Beliebtheit gewinnt – auch oder vielleicht vor allem unter Richterinnen und Richtern. Aber das allein ist noch kein ‚Sieg‘ gegen Umweltzerstörung oder für lokale Gemeinden“, erklärt Mehlhorn. „Was genau bestimmte Formulierungen der Rechte der Natur implizieren und welche Effekte sie haben, das muss jeweils untersucht werden.“

Und damit auch die Funktion der Eigenrechte der Natur, im Fachjargon *rights of nature* genannt. Welche Ziele verfolgen indigene Gruppen, wenn sie sich gegen neue Bergbaulizenzen wehren? Und lässt sich das Konzept von Pacha Mama überhaupt auf andere Regionen und Gemeinschaften übertragen? Schließlich gibt es vielerlei Naturvorstellungen und Ideen von Mutter Erde. Ethnologinnen und Ethnologen wissen es: *One fits all*-Lösungen funktionieren nur selten.

„Umweltrechte sind ein wichtiges neues Instrument, das viel bewirken kann. Gleichzeitig sollten sie aber auch nicht überbewertet werden“, sagt Dirk Hanschel. „Die Menschenrechte auf eine gesunde Umwelt hängen von ihrem konkreten Wert für diejenigen Menschen ab, die von der Umweltzerstörung betroffen sind. Und es ist schwierig, die Eigenrechte der Natur ohne die Menschen zu denken – deren Interessen wiederum sehr vielfältig sind.“





Heimliche Bewohner des Outbacks: Frösche der Gattung *Neobatrachus* zeigen sich nur nachts – und auch dann nur nach starken Regenfällen. Die hier gezeigte Art *Neobatrachus sudellae* hat als genetische Besonderheit einen vierfachen Chromosomensatz.

70

Max-Planck-Forschende kooperieren mit Partnern in mehr als 120 Ländern. Hier schreiben sie über ihre persönlichen Erfahrungen und Eindrücke. Jozefien Van de Velde vom Kölner Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsforschung ist für zwei Monate nach Australien gereist. Im Outback machte sie sich auf die Suche nach Fröschen. Kein leichtes Unterfangen, denn ihre Studienobjekte sind nachtaktiv, verstecken sich bei Trockenheit unter der Erde und kommen nur nach starkem Regen zum Vorschein.

Wie Tiere sich an ihre Umwelt anpassen, um zu überleben, ist für mich immer wieder faszinierend: In meiner Doktorarbeit erforsche ich Frösche der Gattung *Neobatrachus*, die in den Trockengebieten Australiens vorkommen. Um Dürrezeiten zu überstehen, graben sie sich bis zu einem Meter tief ein und umgeben sich mit einer Art

Kokon, der sie vor Austrocknung schützt. So können sie zur Not mehrere Jahre ausharren. Erst wenn es genügend geregnet hat, kommen sie an die Oberfläche, um sich fortzupflanzen.

Interessanterweise sind drei der neun bekannten *Neobatrachus*-Arten polyploid: In ihren Zellen liegt jedes Chromosom in vierfacher Ausführung vor. Die meisten Tiere und auch wir Menschen sind dagegen diploid. In diesem Fall ist jedes Chromosom zweifach vorhanden, einmal als mütterliche und einmal als väterliche Kopie. Polyploide Arten haben oft andere Eigenschaften als ihre diploiden Verwandten. Manche Amphibien mit „zusätzlichen“ Chromosomen sind etwa unempfindlicher gegenüber rauem Klima und Trockenheit und konnten sich daher im Gebirge oder in Wüsten ansiedeln. Generell ist Polyploidie bei Pflanzen häufig, weshalb mein Froschprojekt am Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsforschung angesiedelt ist. Mich interessieren vor allem universelle molekulare Mechanismen: Wie ge-

lingt es, die vielen Chromosomen im Zellkern zu koordinieren? Bei der Zellteilung, bei der das Erbmaterial exakt auf die Tochterzellen aufgeteilt werden muss, ist das entscheidend. Um herauszufinden, welche Gene dabei eine Rolle spielen, vergleiche ich diploide und polyploide Arten von *Neobatrachus*.

Unsere Max-Planck-Forschungsgruppe hat eine Kollaboration mit dem Western Australian Museum in Perth und dem South Australian Museum in Adelaide. In beiden Museen lagern tiefgefrorene *Neobatrachus*-Gewebeproben, aus denen ich DNA extrahieren durfte; zusätzlich habe ich im Freiland nach Fröschen gesucht. Um von der Naturschutzbehörde die nötige Fanggenehmigung zu bekommen, muss man in Australien einen Erste-Hilfe-Kurs belegen. Nach dieser Schulung ist man fürs Outback bestens gerüstet: Man lernt etwa, wie man giftige von ungiftigen Spinnen unterscheidet und was im Notfall nach einem Schlangenbiss zu tun ist. In dem Kurs saßen viele Australier, die sich als Minenarbeiter anheuern

## POST AUS PERTH, AUSTRALIEN

ließen. Im Freiland arbeitete ich mit Paul Doughty zusammen, dem Leiter der Abteilung Herpetologie am Museum in Perth. Bei der Planung unserer Exkursionen zogen wir eine Wetter-App zurate, um zu wissen, wo in absehbarer Zeit mit Regen zu rechnen war, sowie eine Natur-App, die meldet, wo welche Froscharten gesichtet wurden. Waren „unsere“ Frösche dabei, setzten wir uns in Pauls alten Subaru und fuhren los. Die Entfernungen in Australien sind gewaltig. Manchmal saßen wir den ganzen Tag im Auto. Gelangweilt haben wir uns nicht: Paul wusste über seine Forschung genauso viel zu erzählen wie über seine Lieblingsbands. Zwischendurch gab es als kleinen Snack Instant-Nudeln von der Tankstelle. Ansonsten habe ich auf unseren Roadtrips gerne ein wenig geschlafen. Da meine Studienobjekte nachtaktive sind, musste ich abends fit sein!

Bei der nächtlichen Suche nach Wüstenfröschen ist ein gutes Gehör gefragt. Paul ist sehr geübt darin, Amphibien anhand ihres Rufs zu erkennen. Er kann sogar dann einzelne Arten iden-

tifizieren, wenn viele gleichzeitig rufen. Hatte er die richtige Stimme im Ohr, sind wir losgezogen und haben mit unseren Stirnlampen jede kleine Pfütze abgesucht. Dabei sind wir tatsächlich fündig geworden, sodass ich nun genügend DNA-Proben für meine Analysen habe. Nach unseren Streifzügen bin ich oft erst im Morgengrauen todmüde ins Bett gefallen. Übernachtet haben wir meistens in Hostels oder auf Farmen, die Betten für Saisonarbeiter bereitstellen. Das Tolle daran ist, dass man dort Leute aus aller Welt trifft und leicht Kontakte knüpft.

Da ich zum ersten Mal in Australien war, habe ich mir neben den Fröschen natürlich auch andere Vertreter der australischen Fauna angeschaut. Die Quokkas etwa – kleine Beuteltiere, die man auf Rottnest Island in der Nähe von Perth beobachten kann. Weil sie dort keine natürlichen Feinde haben, sind sie sehr neugierig und zutraulich. Das Besondere an ihnen ist ihr Gesichtsausdruck: Sie scheinen andauernd zu lächeln, und so macht allein ihr Anblick gute Laune.



71

FOTO: PRIVAT

Jozefien Van de Velde

26, ist vom skurrilen Aussehen „ihrer“ Frösche genauso begeistert wie von deren Lebensweise und Genetik. Van de Velde stammt aus Belgien und hat an der Universität Gent Biochemie und Biotechnologie studiert. Am Kölner Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsforschung promoviert sie im Rahmen einer der derzeit 68 International Max Planck Research Schools.

# KLEINE GESTE – GROSSE WIRKUNG

Es steht gar nicht gut um den Handschlag. Während der Coronapandemie ist er in Ungnade gefallen. Wie bedeutsam Berührungen für uns dennoch sind, schildert Ella Al-Shamahi in ihrem Buch. Die Paläoanthropologin, die auch als Stand-up-Comedian auftritt, hat den Lockdown genutzt, um Grundlegendes über das vielleicht älteste Begrüßungsritual der Menschen zu erzählen. Der Handschlag ist mal ein Zeichen der Hoffnung und mal des Unheils: Eine Friedensgeste ist er im Jahr 1985, als sich Reagan und Gorbatschow die Hand reichen und damit den Anfang vom Ende des Kalten Kriegs einläuten. Die machtvolle Wirkung dieser simplen Geste beweist Lady Diana, als sie einem Aidspatienten die Hand schüttelt. Dagegen seien die verweigerten Handschläge in der Politik ein verheerendes Signal ebenso wie die Schüttelwettkämpfe von Trump und Macron. Das Buch handelt aber nicht nur vom Handschlag, sondern beleuchtet auch

Herkunft, Bedeutung und kulturelle Vielfalt anderer Gesten wie Fingerschnipser oder gar Penisschlag. Mit ihrem Talent als Komikerin sorgt Al-Shamahi dabei immer wieder für Lacher. So ist ihr ein äußerst amüsantes und zugleich lehrreiches Buch über Bedeutung und Geschichte verschiedener Arten der Begrüßung gelungen. Und klar, es gibt auch den Fistbump oder den Wakanda-Gruß mit geballten Fäusten vor der Brust. Doch mit dem echten Händeschütteln können sie nicht mithalten, meint Al-Shamahi. Denn eines sollte Covid-19 gezeigt haben: Einander zu berühren ist „enorm wichtig“ für uns Menschen.

*Katja Maria Engel*

---

Ella Al-Shamahi  
*Der Handschlag*  
192 Seiten, HarperCollins  
20,00 Euro



72



## VERBORGENE SCHÖNHEIT

Warum haben Insekten unter den Menschen so wenige Freunde? Man freut sich über bunte Schmetterlinge und erkennt den Nutzen der fleißigen Biene, aber sonst? Wespen können empfindlich stechen, und Moskitos sind lästige Blutsauger – nicht zu reden von Flöhen und Wanzen, die obendrein gefährliche Krankheiten übertragen. Obwohl sie so klein sind, begegnen wir Insekten meist mit Argwohn oder Angst. Aber gerade wegen ihrer geringen Größe bleibt uns auch vieles verborgen, was diese Tiergruppe so erfolgreich macht und unsere Bewunderung verdient. Ein Buch wie das von Werner Gnatzy und Jürgen Tautz kann man darum nur begrüßen: Die beiden Insekten-Experten eröffnen darin den Blick auf eine Welt, die sich nur beim genauen Hinschauen offenbart. Ob die wie Opale schimmernden Schuppen eines Rüsselkäfers oder die Rauchgasmelder auf den Antennen der Kiefernprachtkäfer – illustriert mit zahlreichen Makro- und Mikrofotos zeigen die Autoren, mit welcher großartigen „Erfindungen“ es den Insekten

gelingen ist, sich an jede erdenkliche Herausforderung der Umwelt anzupassen. Meist werden die entscheidenden Strukturen nur unter starker Vergrößerung sichtbar, manchmal erst im Elektronenmikroskop, aber immer erstaunt die Eleganz der Problemlösung. Doch bei aller Faszination und Schönheit hat das Buch einen ernstesten Hintergrund: Es sei aus Sorge über das Verschwinden der Insekten aufgrund von Umweltzerstörung entstanden, schreiben die Autoren. In ihrem „Nachwort, fast schon ein Nachruf“ gehen sie auf diese Problematik ein. Ihr Ziel ist es, möglichst viele Menschen für die Insekten zu gewinnen – denn nur was wir kennen und lieben, sind wir bereit zu schützen.

*Rudolf Alexander Steinbrecht*

---

Werner Gnatzy & Jürgen Tautz  
*Insekten – Erfolgsmodelle der Evolution*  
256 Seiten, Springer  
24,99 Euro



# NEU ERSCHIENEN

## QUANTEN- SCHWUBBEL

„Wer sich mit Quantentheorie beschäftigt, wird sich von Anfang an wundern – und wird sich am Ende immer noch wundern. Aber auf deutlich höherem Niveau und mit einem erweiterten Blick auf die Welt.“ Damit bringt Florian Aigner auf den Punkt, was den Leser und die Leserin in seinem Buch erwartet: Partikel, die schlagartig Informationen über ihre Eigenschaften austauschen können, ohne miteinander in Kontakt zu stehen; Elektronen, die offenbar gleichzeitig auf zwei Routen durch einen Doppelspalt fliegen; Licht, das wellenartiges Teilchen und teilchenartige Welle ist. Dieser „Quantenschwubbel“ (Zitat Aigner) lässt sich mit unserer Alltagserfahrung nur schwer begreifen. Aber der Autor schafft es, auf amüsante Weise die Merkwürdigkeiten der Quantenwelt so zu schildern, dass man am Ende das gute Gefühl hat, ihre Regeln in Grundzügen verstanden zu haben. In zwölf Kapiteln erklärt das Buch den Kosmos des Allerkleinsten auf so originelle Weise, dass man immer wieder schmunzeln muss über den Einfallsreichtum des Autors, zum Beispiel wenn er von einer „Katzenverteilungsfunktion“ schreibt. Man erfährt viel über Experimente und die Entwicklung der neuen Physik, die im Jahr 1900 mit Max Planck und seinem Strahlungsgesetz ihren Anfang nahm. Auch Beamen oder Quantenkryptografie werden thematisiert. Witzig sind die eingestreuten Strichzeichnungen, die wie kleine Handzeichnungen wirken. Ein rundum gelungenes Sachbuch.

Helmut Hornung



Florian Aigner  
*Warum wir nicht durch Wände gehen*  
264 Seiten, Brandstätter  
25,00 Euro

## ALLES, NUR NICHT EINSAM!

Das Gefühl, dass sich der Mensch in der von ihm geschaffenen Welt nicht mehr zurechtfindet, war noch nie so stark wie heute. Schuld daran ist – dem Verhaltensbiologen Carel van Schaik und dem Historiker Kai Michel zufolge – unser evolutionäres Erbe. Viele Jahrtausende haben unsere Vorfahren in kleinen, mobilen Gruppen gelebt. Es gab keine Hierarchien, alle kannten sich, und Zusammenarbeit war überlebenswichtig. Wir sind also eine hochgradig soziale Spezies mit einem Gehirn, das darauf ausgelegt ist, die Absichten und Pläne anderer zu durchschauen – und dabei manchmal über das Ziel hinausschießt. Diese Anpassungen an das Leben als Jäger und Sammler bezeichnen die Autoren als die erste Natur des Menschen. Sie ist es, die mit dem modernen Leben ein Problem hat beziehungsweise mit dem, was wir ihr in Form von Kultur und Vernunft als zweite und dritte Natur übergestülpt haben. Mit dem überaus lesenswerten Buch beleben van Schaik und Michel das etwas in Misskredit geratene Genre der evolutionären Psychologie. Anders als Bestseller wie *Warum Männer nicht zuhören und Frauen schlecht einparken*, die vor einigen Jahren traditionelle Geschlechterrollen vermeintlich



wissenschaftlich begründeten, stellen die beiden Autoren überzeugend dar, warum wir Menschen so große Angst vor der Einsamkeit haben, die sozialen Medien uns aber auch nicht glücklich machen. Unsere Jäger- und-Sammler-Vergangenheit ist der Grund dafür, warum sich viele Menschen wieder neuen, alten Glaubensformen zuwenden und warum wir unser Ideal von lebenslangen monogamen Beziehungen nicht immer erfüllen können.

Harald Rösch

Carel van Schaik & Kai Michel  
*Mensch sein*  
384 Seiten, Rowohlt  
24,00 Euro



# FÜNF FRAGEN

## ZU KIPPPUNKTEN UND KLIMAANGST

AN JOCHEM MAROTZKE

**Herr Marotzke, Sie erforschen die atlantische Umwälzströmung. Der Golfstrom ist ein Teil davon und wird auch vom Salzgehalt des Wassers angetrieben. Eine Studie kam kürzlich zu dem Schluss, diese Warmwasserheizung für Europa könnte bald kollabieren, da schmelzendes Grönlandeis den Ozean verdünnt. Ist die Sorge berechtigt, dass dieser Klimakipppunkt irreversibel überschritten wird?**

JOCHEM MAROTZKE: Die erwähnte Studie geht von einem sehr vereinfachten physikalischen Zusammenhang aus, und als Vorhersage ist sie nicht belastbar. Man muss hier und bei anderen Kipppunkten wirklich ein differenziertes Bild zeichnen. Das Bild eines Kipppunkts, das man oft im Kopf hat, ist: Da fällt was um und steht nicht wieder auf. Bei sehr vielen der Kipppunkte, die diskutiert werden, gibt es aber noch ganz viel Unsicherheit, ob sie tatsächlich eintreten werden.

**Die Darstellung statistischer Unsicherheiten in der Öffentlichkeit kann zu Verunsicherung führen. Wie gehen Sie damit um?**

Ich habe bewundert, wie Herr Drosten während der Pandemie kommuniziert hat. Wissenschaft ist komplex und selten schwarz oder weiß, und auch ich erkläre daher lieber die Zusammenhänge. Ich bin mir aber bewusst, dass ich vorsichtig sein muss, wenn es darum geht, wie ich Forschungsergebnisse darstelle. Daher skizziere ich bei Vor-

trägen immer zuerst, was wir ganz sicher wissen, nämlich: Die beobachtete Erwärmung ist auf den Menschen zurückzuführen. Punkt. Wir erwarten auch extremeres Wetter. Es ist aber etwas anderes, sich in Einzelfällen wie bei Kipppunkten ganz sicher zu sein.

**Wie sicher muss man sich sein, um zu handeln? Es gibt in der Klimaforschung doch einen Konsens, dass wir ein ernsthaftes Problem haben.**

Es ist sicher nicht klug zu warten, bis man sich absolut sicher ist. Es ist eine politische Frage, wie Entscheidungen unter Unsicherheit getroffen werden. Natürlich muss man den Klimamodellen vertrauen. Starke Niederschläge und Dürren werden zunehmen. Aber es widerspricht dem wissenschaftlichen Codex, für einen guten Zweck im Zweifel davon auszugehen, man wisse mehr, als man wirklich weiß.

**Wissenschaft und Politik haben häufig verschiedene Werte und Ziele. Und die Öffentlichkeit hegt Erwartungen an beide Seiten.**

Die Politik muss sehr viel mehr einbeziehen als nur wissenschaftliche Erkenntnis. Zu Recht. Gut gemachte Politik sorgt in einer Demokratie für einen Interessenausgleich und hat eine Leitfunktion, die ich sehr schätze. Wenn Politik so streng konsistent wäre, wie die Wissenschaft es sein muss, wäre sie handlungsunfähig. Ich wünsche mir aber, dass die Politik Wissen systematischer heranzieht und dass es mehr Zeit für

Diskurse gibt. Damit das klappt, müssen beide Seiten lernen, einander besser zu verstehen.

**Im Film *Don't Look Up* rast ein Asteroid auf die Erde zu. Die Wissenschaft versucht alles, damit diese Bedrohung ernst genommen wird. Politik und Zivilgesellschaft aber beruhigen: „Just don't look up!“ Wie stellt man unangenehme Fakten so dar, dass die Gesellschaft handlungsfähig bleibt?**

Ein Positivbeispiel: In der Pandemie haben die Behörden am Anfang entschlossen und effektiv reagiert, dann ist man vom Krisenmodus in den Risikovorsorgemodus übergegangen. Der Klimawandel ist aber keine Krise, die vorübergeht. Er wird bleiben. Den Krisenmodus hält man nicht lange durch. Gleichzeitig müsste man natürlich viel schneller und entschiedener handeln, um die Klimaziele zu erreichen. Das ist ein schmaler Grat, auch in der Kommunikation. Möchte ich wachrütteln, zu Sofortmaßnahmen aufrufen oder möglichst präzises Wissen als Entscheidungsgrundlage vermitteln? Die Angst, wir überschreiten 1,5 Grad und dann kippt alles, ist auf jeden Fall wissenschaftlich haltlos und lähmt.

*Interview: Tobias Beuchert*

Jochem Marotzke ist Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie.

- 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)

**Redaktion**

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

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

**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

In eigener Sache: Dies ist die letzte Ausgabe der *Max Planck Forschung*, an der unsere im Dezember 2023 viel zu früh verstorbene Kollegin Mechthild Zimmermann noch mitgewirkt hat. Sie gehörte der Wissenschaftsredaktion seit 2014 an und betreute ein immenses Themenspektrum – von juristischen und sozialpolitischen über wissenschaftshistorische bis hin zu kunsthistorischen Beiträgen. Ihre fachliche Kompetenz, ihr journalistisches Gespür, ihre Stilsicherheit sowie ihre Begeisterung für die Arbeit in der Redaktion werden uns sehr fehlen, wir vermissen sie aber auch schmerzlich als Mensch.

Ein Nachdruck der Texte der *Max Planck Forschung* ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet. 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 85 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 24000 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 7000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. 2022 betrug die Grundfinanzierung durch Bund und Länder 2,0 Milliarden Euro. Die Max-Planck-Institute betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die Max-Planck-Gesellschaft ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.

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



**MAX PLANCK**  
GESELLSCHAFT

