

Ausgabe 02 | 2023

MAX PLANCK

Forschung

75^{JAHRE} MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT
Die Erde im Vitaltest

PSYCHOLOGIE
Künstliche Intelligenz auf der Couch

RECHTSWISSENSCHAFTEN
Wenn Staaten versinken



WELTEN BEWEGEND



Anziehendes Spektakel: Stephans Quintett ist benannt nach dem französischen Astronomen Édouard Jean-Marie Stephan, der die fünf Galaxien 1877 entdeckte. Die Aufnahme des James-Webb-Teleskops bildet einen Himmelsausschnitt ab, der ein Fünftel des Mond-durchmessers hat. Die vier Galaxien, die rechts von der Bildmitte übereinanderstehen, sind 290 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Ihre leuchtenden Bögen weisen auf eine Dynamik durch ihre gegenseitige Anziehung hin. Die Galaxie links von der Mitte befindet sich zwar im selben Himmelsausschnitt, ist aber nur rund 40 Millionen Lichtjahre von uns entfernt.

EDITORIAL

Liebe Leserin, lieber Leser

Der Blick in den Sternenhimmel fasziniert uns Menschen nicht nur, seit jeher hilft er uns auch bei der Erstellung von Kalendern oder bei der Navigation. Vor allem aber bestimmt er unser Welt- und Selbstbild. Die Position im Universum, in der sich der Mensch verortet, ist dank astronomischer Erkenntnisse vom Mittelpunkt immer mehr an den Rand gerückt. Heute ist klar, dass selbst unser Sonnensystem nur eine Randexistenz in der Milchstraße fristet, dass es im Universum zahllose Planeten wie den unseren gibt und darüber hinaus nicht minder viele Galaxien.

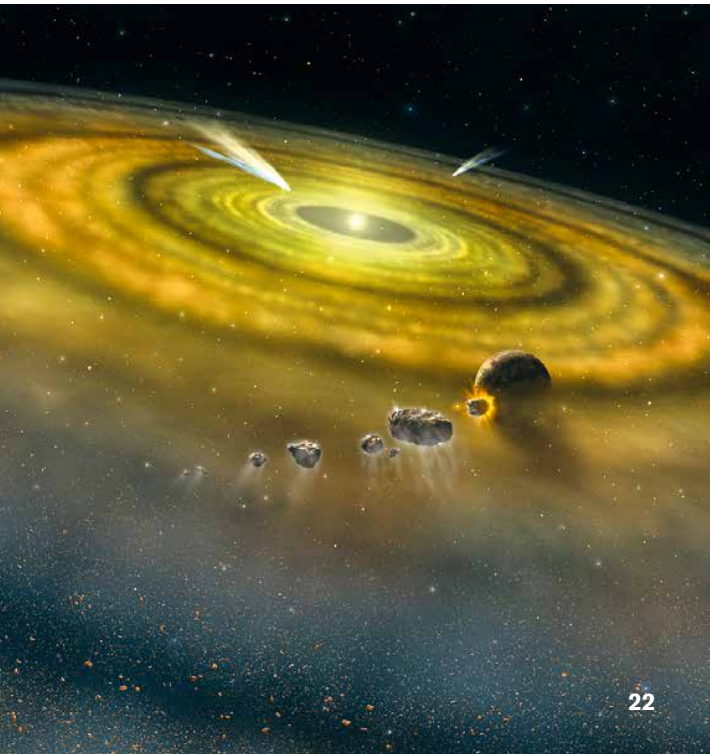
Dabei sind selbst zu unserem Sonnensystem noch viele Fragen offen. So untersuchen Forschende, wie die Erde und die Planeten in ihrer Nachbarschaft im Detail entstanden sind. Woher stammte das Baumaterial? Warum bildeten sie sich unterschiedlich schnell? Und warum herrschen gerade auf der Erde Bedingungen, unter denen sich Leben entwickeln konnte?

Während sich diese Fragen nach kosmischen Maßstäben in greifbarer Nähe erkunden lassen, liegen viele andere Ziele astronomischer Forschung in fernen Galaxien und beeindrucken durch kaum vorstellbare Dimensionen und Eigenschaften – etwa schwarze Löcher mit der millionenfachen Masse unserer Sonne. Manchmal kreisen in einer Galaxie sogar zwei schwarze Löcher umeinander. Moderne Teleskope ermöglichen es, sich ein Bild zu machen von solchen Systemen und den Prozessen, die in ihnen ablaufen.

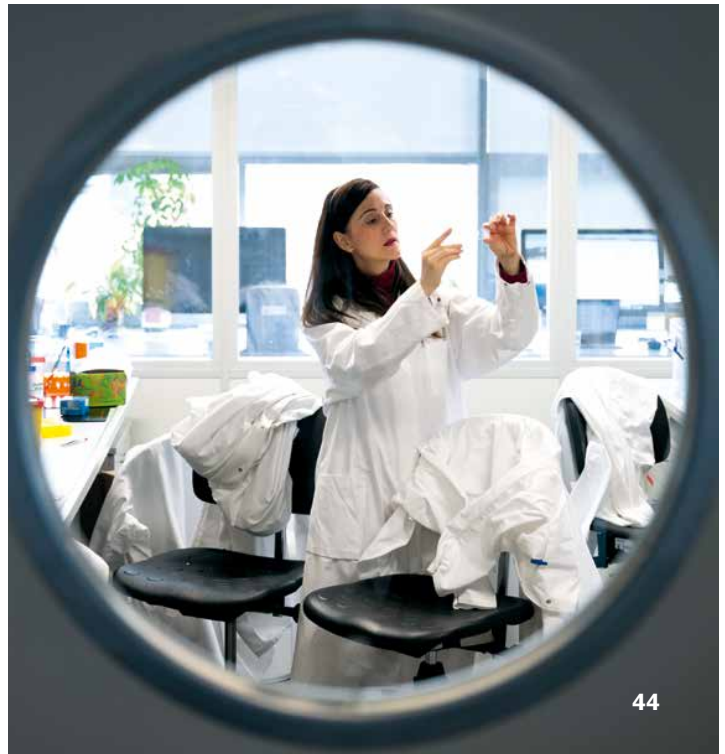
Die Faszination für das Universum wirkt auch in Regionen, von denen man denken könnte, dort gebe es existenziellere Anliegen, etwa in Madagaskar, einem Land mit einem der weltweit niedrigsten Bruttoinlandsprodukte. Seit in Aussicht steht, Standort für Antennen eines internationalen Großteleskops zu werden, begeistern sich dort viele Menschen für Astronomie. Die Begeisterung könnte junge Leute zum Studium von Natur- oder Technikwissenschaften anregen, was wiederum zur Entwicklung des Landes beitragen könnte.

So ist die Astronomie für viele Überraschungen gut, nicht nur im Weltall. In diesem Sinne wünschen wir Ihnen eine spannende Lektüre!

Ihr Redaktionsteam



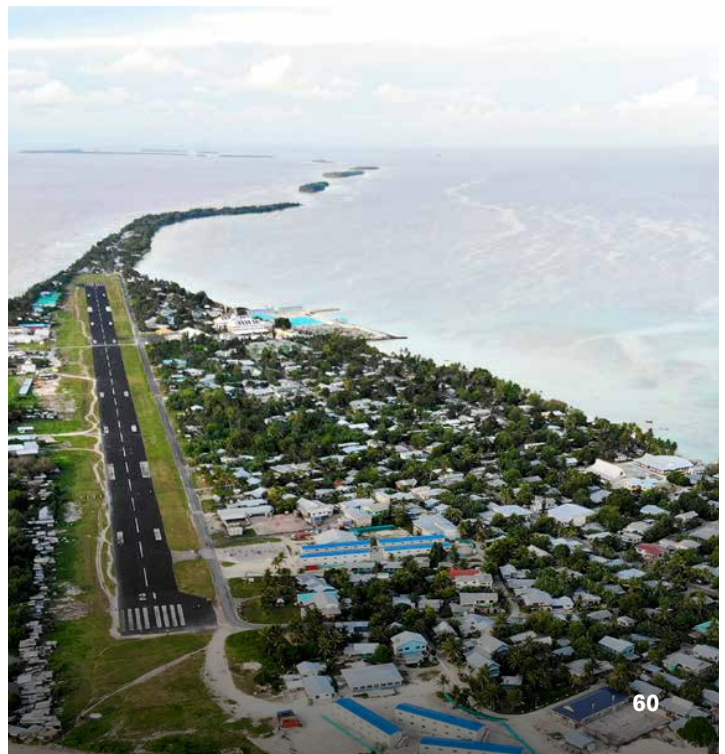
22



44



72



60

22 | HARTE BROCKEN

Planeten entstanden durch die Zusammenballung von Staub zu festen Körpern.

44 | HARTE ARBEIT

Meritxell Huch lässt für die Forschung nicht nur die Mittagspause ausfallen.

72 | HARTER TEST

Psychologische Aufgaben entlarven die Schwächen von ChatGPT.

60 | HARTES SCHICKSAL

Durch den Klimawandel könnten Inselstaaten bald im Meer versinken.

BILDER: NASA/FUSE/LYNETTE COOK (LINKS OBEN); SVEN DÖRING FÜR MPFG (RECHTS OBEN); KI BILD MIDJOURNEY | GESINE BORN | BILDERINSTITUT (LINKS UNTEN); MARIO TAMAI/GETTY IMAGES (RECHTS UNTEN)

03 | EDITORIAL

06 | ORTE DER FORSCHUNG

Zweieinhalb Meilen unter dem Meer

8 | KURZ NOTIERT

16 | ZUR SACHE

Flüchtige Jugend

Geflüchtete Jugendliche werden sehr unterschiedlich behandelt, je nachdem, ob sie bereits achtzehn Jahre alt sind oder jünger. Sinnvoller wäre es, auf die Bedürfnisse der Einzelnen einzugehen.

20 | INFOGRAFIK

Eine Welt voller Sechsecke

IM FOKUS

Welten bewegend

22 | Aus Staub geboren

Das Leben auf der Erde ist vielen Zufällen zu verdanken – und dem Aufbau unseres Sonnensystems. Dessen Entstehungsgeschichte sind Forschende auf der Spur.

30 | Madagaskar greift nach den Sternen

Schon die Aussicht, Standort eines astronomischen Observatoriums zu werden, verändert Bildung und Wissenschaft in Madagaskar.

36 | Tanz der schwarzen Löcher

Die Astronomie kann inzwischen tief in die aktiven Kerne von Galaxien blicken, wo riesige Mengen an Energie freigesetzt werden. Dort sind Forschende auf schwarze Löcher im Doppelpack gestoßen.

44 | BESUCH BEI

Meritzell Huch

50 | ZWEITER BLICK

52 | 75 JAHRE MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Die Erde im Vitaltest

Um ökologische Krisen wie Klimawandel und Artensterben einzudämmen, müssen wir die Erde als Ganzes verstehen. Max-Planck-Institute haben dafür Großes geleistet.

WISSEN AUS

60 | Wenn Staaten versinken

Wenn der Meeresspiegel weiter ansteigt, werden einige Inselstaaten in absehbarer Zeit untergehen. Die Rechtswissenschaft sucht nach Lösungen für die betroffenen Länder.

66 | Lauf, Roboter!

Sicher zu gehen ist für zweibeinige Roboter immer noch eine Herausforderung. Mit Beinen, die denen eines Laufvogels nachempfunden sind, könnte das künftig gelingen.

72 | Künstliche Intelligenz auf der Couch

Seit der Veröffentlichung von ChatGPT wird darüber diskutiert, welche Fähigkeiten künstliche Intelligenz besitzt. Psychologische Tests mit dem Algorithmus führten zu überraschenden Ergebnissen.

78 | POST AUS ...

Pennsylvania, USA

80 | NEU ERSCHIENEN

82 | FÜNF FRAGEN

zu den Kosten des Klimawandels

83 | IMPRESSUM

5

GEOMAX

Überfischte Meere –
Leben im Ozean aus
der Balance



ZWEIEINHALB MEILEN
UNTER DEM MEER

Mit rund 4000 Metern ist das Polarmeer weit weniger tief, als Jules Verne es sich einst vorstellte. Und doch ist es ein extremer Lebensraum, über den wir bis heute nur wenig wissen: Kälte, Dunkelheit, bedeckt mit Eis, am Meeresboden kaum organisches Material als Nährboden für Mikroorganismen. Kann es hier überhaupt Leben geben?

6 Bekannte Lebensinseln in der Tiefsee sind sogenannte Schwarze Raucher: Dort, wo die tektonischen Platten aufeinanderstoßen, bilden Unterwasservulkane hydrothermale Quellen. Hier tritt sehr heißes, sauerstofffreies Wasser aus, in dem große Mengen an Eisen, Mangan, Kupfer sowie Schwefelverbindungen, Wasserstoff und Methan gelöst sind. Mischt sich dieses heiße Wasser mit dem umgebenden kalten, sauerstoffhaltigen Seewasser, fallen die Mineralstoffe aus, und es entstehen grauschwarze „Rauch“-Säulen. Daher der Name Schwarzer Raucher.

An den Rauchern können sich vielfältige Biotope bilden – mit Arten, die nur hier existieren. Bakterien nutzen insbesondere Schwefel und Wasserstoff als Energiequelle und bilden so die Grundlage einer artenreichen Nahrungskette: Röhrenwürmer, Krabben, Muscheln und sogar einige Fische.

Lange waren Forschende überzeugt, dass es im Nordpolarmeer weder Vulkane noch hydrothermale Quellen gibt. Doch Anfang der 2000er-Jahre fand man sie: am Gakkel Ridge, einem Meeresrücken, der sich von Grönland bis nach Sibirien erstreckt. Der Schwarze Raucher Enceladus, der hier zu sehen ist, liegt im Aurora Vent Field an der westlichsten Spitze des Gakkel Ridge. Während einer Expedition mit dem Forschungsschiff Polarstern hat eine Gruppe des Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie hier Bakterien der Gattung *Sulfurimonas* genau unter die Lupe genommen. Eine dabei neu entdeckte Art trägt in ihrem Genom Hinweise darauf, wie die ökologische Verbindung zwischen diesem hoch spezialisierten Lebensraum und dem offenen Ozean aussehen könnte.



ORTE DER FORSCHUNG



FOTO: HAGON CRUISE 2021, REV OCEAN

EXZELLENZFÖRDERUNG IN AFRIKA

Die Max-Planck-Gesellschaft und die Alexander von Humboldt-Stiftung planen die Einrichtung von drei Max Planck-Humboldt Research Units in Afrika. Ausgeschrieben werden drei Forschungsgruppenleitungen an afrikanischen Einrichtungen. Die Max-Planck-Gesellschaft zahlt den Leiterinnen und Leitern für fünf Jahre Forschungsmittel in Höhe von jährlich jeweils 150.000 Euro. Die

Forschungsgruppen sollen mit einem Max-Planck-Institut ihrer Wahl zusammenarbeiten und gemeinsam Nachwuchs ausbilden. „Wir fördern nicht ein Forschungsthema, sondern wir fördern junge Talente, die ihre eigenen Ansätze und Themen mitbringen“, erklärte Max-Planck-Präsident Martin Stratmann bei der Eröffnung des Programms die Grundzüge des Modells, das die Max-

Planck-Gesellschaft bereits seit Längerem auf anderen Kontinenten einsetzt. Das Ziel: Sehr gute Forschende, die durch die Leitung dieser Forschungsgruppen besser sichtbar werden, sollen begabten Nachwuchs anziehen. So entstehen positive Rückkopplungsschleifen – und damit Keimzellen für wissenschaftliche Exzellenz in Afrika.

www.mpg.de/20343908



FOTO: ILJA C. HENDEL / WISSENSCHAFT IM DIALOG

BLICK INS ALL

Das Wissenschaftsjahr 2023 steht unter dem Motto „Unser Universum“ und ist für eine Reihe von Max-Planck-Instituten Anlass, sich und ihre Forschung der Öffentlichkeit zu präsentieren. Gleich zwei Ausstellungen reisen dieses Jahr durch Deutschland: die MS Wissenschaft, ein schwimmendes Science Center, sowie die Ausstellung „Universe on Tour“, ein mobiles Planetarium samt Ausstellungszelt. Beide machen noch bis in den Herbst hinein in rund vierzig Städten quer durch die Republik Station. Das Angebot ist vielfältig: Im mobilen Planetarium können Besuchende in Liveshows über eine 360-Grad-Projektion in das Universum eintauchen. Astronomische Forschungseinrichtungen vor Ort, darunter auch Max-Planck-Institute, berichten im Anschluss an jede Show von ihrer aktuellen Forschung. Auf der MS Wissenschaft laden dreiBig interaktive Exponate dazu ein, das All zu entdecken.

www.mpg.de/20280458

Die MS Wissenschaft hat dieses Mal thematisch das Universum an Bord und ist noch bis Ende September 2023 auf Flüssen und Kanälen in Deutschland und Österreich unterwegs.

AUSGEZEICHNET ★

PATRICK CRAMER

Der Direktor am Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften und neue Präsident der Max-Planck-Gesellschaft ist mit dem Shaw-Preis geehrt worden. Die hohe Auszeichnung teilt sich Patrick Cramer mit Eva Nogales von der University of California in Berkeley. Beide haben wesentlich dazu beigetragen, die Gentranskription, einen der grundlegenden Prozesse des Lebens, strukturell biologisch aufzuklären. Der Shaw-Preis wird jährlich in den Lebenswissenschaften, der Mathematik und der Astronomie vergeben und ist mit jeweils einer Million US-Dollar dotiert.



FOTO: DAVID AUSSERHOFER/MPG

ERIN SCHUMAN

Mit dem Brain Prize 2023 würdigt die Lundbeck-Stiftung die Pionierarbeiten von Erin Schuman, Direktorin am Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt, sowie von Christine Holt, University of Cambridge, und Michael Greenberg, Harvard Medical School. Die Forschenden haben unser Verständnis davon revolutioniert, wie Nervenzellen die Produktion der vielen Tausend Proteine des Gehirns regulieren. Der Brain Prize ist der weltweit wichtigste neurowissenschaftliche Forschungspreis, das Preisgeld beträgt rund 1,3 Millionen Euro.



FOTO: G. LAURENT

KURZ NOTIERT



FOTO: PICTURE ALLIANCE / SWEN PFORTNER

Mit der Amtskette übernahm der neue Präsident der Max-Planck-Gesellschaft Patrick Cramer (links) auch symbolisch die Aufgaben von Martin Stratmann (rechts).

PATRICK CRAMER IST MAX-PLANCK-PRÄSIDENT

Auf der Hauptversammlung der Max-Planck-Gesellschaft in Göttingen übernahm Patrick Cramer am 22. Juni 2023 das Präsidentenamt von Martin Stratmann. Cramer würdigte die Verdienste seines Vorgängers unter anderem um die Förderung von Forscherinnen und des wissenschaftlichen Nachwuchses. Mit Initiativen wie dem Cyber Valley, den Max Planck Schools, dem Dioscuri-Exzellenz-Programm für Osteuropa und dem Vorschlag der Agentur für Sprunginnovationen (Sprind) habe Stratmann Impulse für Deutschland und Europa gesetzt. Weiter skizzierte Cramer in der Antrittsrede drei Handlungsfelder für die nächsten Jahre: Ein zentrales Anliegen ist ihm, Mitarbeitende für die Wissenschaft und den wissenschaftsstützenden Bereich zu gewinnen und sie zu

fördern. Dabei sei wichtig, die Menschen in ihrer Vielfalt wahrzunehmen und anzuerkennen: „Alle sind willkommen, die unsere Werte teilen“, betonte Cramer. Ein weiterer Fokus liegt auf der Weiterentwicklung der internationalen Strategie der Max-Planck-Gesellschaft unter erschwerten Bedingungen. Es gelte, neue Partner in Asien, Afrika und Lateinamerika zu suchen und ihnen auf Augenhöhe zu begegnen. Das dritte zentrale Thema sieht der neue Präsident in der Verantwortung der Forschung, Arbeiten nach ethischen Maßstäben und möglichst umweltverträglich durchzuführen und die erzielten Ergebnisse frei zugänglich zu machen. Die Wissenschaft müsse sich zudem mehr in gesellschaftliche Debatten einbringen.

www.mpg.de/20488005

MILLIONEN FÜR PROXIMA FUSION

Proxima Fusion ist die erste Ausgründung aus dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. Das Start-up wurde von ehemaligen Wissenschaftlern und Ingenieuren aus dem Max-Planck-Institut sowie dem MIT und Google-X gegründet. Das Ziel der Gruppe ist es, bis in die 2030er-Jahre einen Hochleistungsstellarator zu entwickeln: eine Fusionsanlage, die energiereiches ionisiertes Gas, das sogenannte Plasma, in einem ringförmigen Magnetfeld einschließt und aus der Verschmelzung der Atomkerne Energie gewinnt. Die Arbeiten von Proxima Fusion bauen auf dem Stellarator Wendelstein 7-X des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik auf, der mit Abstand fortschrittlichsten Anlage ihrer Art. Das Start-up hat jetzt sein Pre-Seed-Fundraising in Höhe von sieben Millionen Euro abgeschlossen. Damit kann das Team die nächsten Schritte in Richtung eines Fusionskraftwerks gehen.

www.mpg.de/20380035

BLUTDRUCK UND PSYCHE

Psychische Faktoren können die Behandlung von Bluthochdruck erschweren. Wie eine groß angelegte Studie des Max-Planck-Instituts für Kognitions- und Neurowissenschaften ergab, ist ein krankhaft hoher Blutdruck einerseits oft mit Symptomen einer Depression verbunden. Das deckt sich mit Beobachtungen aus der klinischen Praxis, wonach die

Betroffenen sich müde und abgeschlagen fühlen und ihre blutdrucksenkenden Medikamente nicht nehmen, weil diese zusätzlich auf die Stimmung schlagen. Wie die Studie andererseits zeigt, fühlen sich Menschen, bei denen nur spezielle Teilwerte erhöht sind, insgesamt wohler und sind emotional stabiler. Denn bei höherem Blutdruck steigt auch die

Schmerzschwelle – sowohl für körperliche als auch für seelische Leiden oder Stress. Beide Phänomene erschweren die Therapie von Bluthochdruck. Die Forschenden fordern daher, diese Wechselwirkungen von psychischen und physischen Faktoren in der Behandlung künftig stärker zu berücksichtigen.

www.mpg.de/20162308

Sichere Seite: Wenn Menschenaffen zwischen einem durchsichtigen Becher mit einer Weintraube und einem undurchsichtigen Becher mit einer eventuell größeren Belohnung entscheiden müssen, wählen die meisten von ihnen das, was sie sehen.

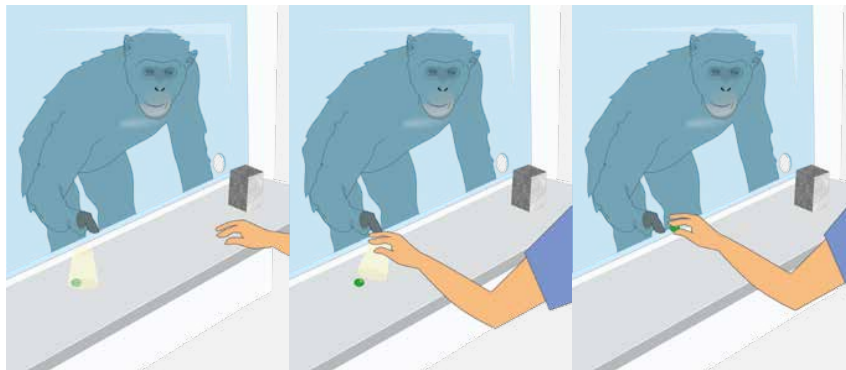


BILD: SÁNCHEZ-AMARO, ROSSANO, CC-BY 4.0

NEUGIER, AUF DIE PROBE GESTELLT

Menschen sind neugierig und probieren gerne Unbekanntes aus. Aber gilt das auch für Menschenaffen? Dieser Frage sind zwei Forscher des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie und der University of California San Diego in einem Experiment nachgegangen. Sie ließen erwachsene Schimpansen, Gorillas, Bonobos und Orang-Utans zwischen zwei umgedrehten Plastikbechern wählen. Ein Becher war durchsichtig und enthielt eine kleine Belohnung, während in dem undurchsichtigen eine größere Belohnung wartete. Eine ähnliche Aufgabe

stellten die Forscher Kindern im Alter von drei bis fünf Jahren. Im Durchschnitt verzichteten Kinder auf die sichere Belohnung zugunsten der unbekannteren – in zwei Versionen der Studie wählten 85 beziehungsweise 77 Prozent der Kinder mindestens einmal den undurchsichtigen Becher, verglichen mit 24 Prozent der Menschenaffen. Wenn die Affen aber die versteckten Belohnungen einmal zu sehen bekommen hatten, lernten sie, in darauffolgenden Versuchen ebenfalls die unsichere Option zu erkunden.

www.mpg.de/20401179

DUFT GEGEN KANNIBALEN

Wanderheuschrecken können von Einzel- zu Schwarmtieren werden, wenn die Dichte der Insekten hoch ist. Schon länger wird vermutet, dass Kannibalismus zum Schwarmverhalten der Heuschrecken beiträgt: Die Schwärme, die etwa in Afrika manchmal ganze Ernten vernichten, könnten deshalb immer weiterziehen, weil die Tiere buchstäblich auf der Flucht vor den Artgenossen sind. Forschende des Max-Planck-Instituts für chemische Ökologie in Jena haben diese Annahme nun bestätigt: Sie entdeckten, dass der Kannibalismus unter Europäischen Wanderheuschrecken (*Locusta migratoria*) umso mehr zunimmt, je mehr schwarmbildende Tiere in einem Käfig gehalten werden. Von allen Duftstoffen, die Heuschrecken im Schwarm abgeben, fällt einer besonders auf: Phenylacetoneitril. Diese Substanz wirkt als einzige abschreckend auf andere Heuschrecken, sie schützt ihre Träger also vor Artgenossen. Tests an 49 Geruchsrezeptoren führten das Team schließlich auf die Spur des Duftrezeptors für Phenylacetoneitril auf der Oberfläche der Riechsinneszellen. Die Forschenden hoffen nun, dass sich die Heuschrecken kannibalistischer verhalten, wenn der Duftrezeptor gehemmt wird. Auf diese Weise könnten sich die Schwärme auflösen lassen. www.mpg.de/20276501

SCHÖPFUNG DURCH METEORITEN

Eisenmeteoriten, die auf die frühe Erde fielen, könnten eine zentrale Rolle bei der Entstehung des Lebens gespielt haben: Als die Himmelskörper in die Erdatmosphäre eindringen, regnete es feine Eisenpartikel. Die Metallteilchen könnten in der kohlendioxidreichen Uratmosphäre die Bildung der ersten organischen Moleküle katalysiert haben, darunter Kohlenwasserstoffe, Acetaldehyd oder Formaldehyd. Auch die chemische Industrie nutzt Eisen als Katalysator für solche Substanzen. Aus den Stoffen könnten sich dann Aminosäuren und Nukleobasen gebildet haben, die als Bausteine von Proteinen beziehungsweise DNA für die Entstehung des Lebens notwendig sind. Forschende des Max-Planck-Instituts für Astronomie und der Ludwig-Maximilians-Universität München haben diese Annahmen nun im Labor bestätigt. In einer Druckkammer erzeugten sie ein Gemisch aus CO₂- und Wasserstoffgas und simulierten damit die

damalige Erdatmosphäre, die hauptsächlich aus CO₂ und Wasserstoff bestand und wegen der großen Gasmenge einen vielfach höheren Luftdruck gehabt haben könnte als die heutige. An Eisenstaub, der dem

Abrieb einfallender Meteoriten sehr ähnlich ist, reagierte das Gasgemisch wie erwartet zu einer Reihe von komplexen organischen Verbindungen.

www.mpg.de/20329032

Ein kleines Fragment des Campo-del-Cielo-Eisenmeteoriten. Beim Eintritt in die Erdatmosphäre schmolz die Oberfläche auf, und es bildeten sich die glatten Strukturen.



FOTO: O. TRAPP

11

PILLEN NACH MASS

Tabletten könnten künftig in Formen produziert werden, die an Designobjekte erinnern. Und das wäre keine ästhetische Spielerei, sondern diente dazu, medizinische Wirkstoffe im Körper kontrolliert freizusetzen. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Informatik in Saarbrücken und der University of California, Davis ermittelt zunächst, welche Form eine Pille haben muss, damit der Wirkstoff in einem

gewünschten Zeitverlauf abgegeben und der optimale Substanzspiegel im Körper erreicht wird. Die berechneten Strukturen erinnern mal an Salzkristalle, mal an Kieselsäuren und manchmal sogar an extravagante Designobjekte. 3D-Drucker können solche ausgefallenen Tabletten problemlos produzieren. Die Rechenmethode lässt sich aber auch so abwandeln, dass sie nur Formen ergibt, die durch

gängige Verfahren zur pharmazeutischen Massenproduktion hergestellt werden können. Die Freisetzung eines Wirkstoffs allein über die Tablettenform zu kontrollieren, wäre deutlich praktikabler als ein alternativer Ansatz, bei dem Pillen aus verschiedenen Trägermaterialien mit unterschiedlichen Wirkstoffkonzentrationen zusammengesetzt werden.

www.mpg.de/20337950

Bei diesen Pillen aus dem 3D-Drucker wird der Wirkstoff dank der ausgefallenen Formen in einem gewünschten Zeitverlauf freigesetzt.



FOTO: MPI-INF





Auch während der langen Ruhephase im Winter ist ein Braunbär vor Thrombosen geschützt.

12

VORURTEILE FÖRDERN KORRUPTION

Menschen richten sich in ihrem Verhalten sehr oft nach dem, was sie von anderen erwarten. Diese an sich positive soziale Kompetenz hat allerdings auch negative Seiten – etwa im Fall von Korruption: In einer repräsentativen Studie mit mehr als 5500 Menschen aus 18 Ländern hat ein Forschungsteam des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung sowie der Universitäten Köln und Amsterdam die Rolle von Vorurteilen bei Bestechung untersucht. In einem Onlinespiel sollten die Teilnehmenden entscheiden, ob sie dem Gegenüber ein Schmiergeld anbieten oder nicht. Die andere Seite konnte das Geld annehmen oder ablehnen. Die Spielerinnen und Spieler interagierten sowohl mit Landsleuten als

auch mit Teilnehmenden aus den anderen Nationen. Das Ergebnis: Mitspielenden aus vermeintlich korrupten Ländern wurde überdurchschnittlich oft Schmiergeld angeboten. Allerdings ließen sie sich seltener auf die Bestechungsversuche ein, als ihre Mitspielenden erwarteten. Gleichzeitig unterschätzten die Spielerinnen und Spieler, wie oft Teilnehmende aus Ländern mit integrem Ruf das Geld annahmen. Aus welcher Nation die Personen stammten, die Schmiergeld anboten, war hingegen nachrangig. Um Korruption international einzudämmen, empfiehlt das Forschungsteam, Vorurteile über die Bestechlichkeit bestimmter Nationen zu bekämpfen.

www.mpg.de/20245485

DURCH DEN WINTER OHNE THROMBOSE

Bären im Winterschlaf bewegen sich monatelang fast überhaupt nicht. Wenn gesunde Menschen so lange im Bett liegen würden, könnten sie leicht eine Thrombose erleiden. Ein Forschungsteam hat nun einen Mechanismus entdeckt, der die Entstehung solcher Blutgerinnsel verhindert. Forschende des Klinikums der Ludwig-Maximilians-Universität München haben dazu Blutproben von Braunbären aus Schweden analysiert. Ihre Ergebnisse zeigen, dass an der Blutgerinnung beteiligte Blutplättchen während des Winterschlafs deutlich weniger mit Entzündungszellen des Immunsystems wechselwirken, als sie das bei wachen Bären tun. Das gleiche Phänomen wiesen die Forschenden bei querschnittsgelähmten Patienten nach. Verantwortlich dafür ist offenbar der Mangel eines Proteins namens HSP47. Forschende des Max-Planck-Instituts für Biochemie haben mit der von ihnen maßgeblich mitentwickelten Massenspektrometrie von Proteinen gemessen, dass Bären im Winterschlaf sehr viel weniger HSP47 produzieren. Auch bei Menschen, die krankheitsbedingt lange Zeit bewegungsunfähig sind, wies das Team deutlich verringerte Mengen des Proteins nach. Die Forschenden der Universitätsklinik wollen nun nach geeigneten Molekülen suchen, die HSP47 ausschalten und so das Thromboserisiko senken.

www.mpg.de/20168059

40%

effizienter kann eine Legierung aus Niob, Eisen und Antimon Wärme in Strom umwandeln, wenn sie mit Titan versetzt wird.

MEHR STROM AUS ABWÄRME

Solange wir noch nicht ohne fossile Brennstoffe auskommen, sollten wir diese zumindest möglichst effizient nutzen. Thermoelektrische Materialien könnten dabei helfen, denn sie können aus der Abwärme, die bei der Verfeuerung von Kohle, Öl und Gas unweigerlich frei wird, Strom erzeugen: Eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Enden etwa eines Drahts aus Niob, Eisen und Antimon bewirkt, dass es dort jeweils unterschiedlich viele energiereiche Elektronen gibt. Das lässt sich ausnutzen, um eine elektrische Spannung zu erzeugen. Bislang sind thermoelektrische Materialien aber nicht effizient genug für die technische Anwendung. Forschende des Max-Planck-Instituts

für Eisenforschung haben die Effizienz eines vielversprechenden Thermoelektrikums aus Niob, Eisen und Antimon nun um bis zu 40 Prozent gesteigert, indem sie dem Material Titan zusetzten. Das Metall sammelt sich an den Grenzen zwischen den winzigen Kristallkörnern an, aus denen das Material wie alle metallischen Werkstoffe besteht. Diese Veränderung der Mikrostruktur führt dazu, dass mit dem Material bei gleicher Temperaturdifferenz eine höhere Spannung erzeugt werden kann. Die Effizienzsteigerung ist jedoch nur ein erster Schritt, für die Praxis müssen Thermoelektrika noch deutlich effizienter werden.

www.mpg.de/20011584

FREMDER RAUCH IM AMAZONAS

Bis zu zwei Drittel des Rußes über dem zentralen Amazonasregenwald stammen aus Afrika. Zu diesem Ergebnis kommt ein Team unter Leitung des Mainzer Max-Planck-Instituts für Chemie und der Universität von São Paulo. Dass Rauch aus Afrika nach Südamerika strömt, war bereits bekannt. Wie viel, war bislang allerdings unklar. Nun haben die Forschenden einen Weg gefunden, die Quellen der Rußpartikel anhand der Eigenschaften der Teilchen zu unterscheiden. Demnach sind Rußpartikel aus Afrika deutlich größer als die aus dem Amazonasgebiet und enthalten weniger organisches Material. So stellte das internationale Team fest, dass Buschfeuer und brennende Savannen im nördlichen und südlichen Afrika erheblich stärker zur Luftverschmutzung in Zentralamazonien beitragen als bislang angenommen. Besonders hoch ist der Anteil des afrikanischen Rauchs in der Regenzeit, wenn die Luft im Amazonas meist sehr sauber ist. Der afrikanische Ruß führt dann dazu, dass die Luft dort manchmal so schmutzig wird wie in einer europäischen Großstadt. In der Trockenzeit, wenn wegen zahlreicher natürlicher und menschengemachter Feuer im Regenwald ohnehin viel Rauch in der Luft hängt, erhöht der Ruß aus Afrika die Belastung zusätzlich. Diese Luftverschmutzung wirkt sich nicht nur auf die Gesundheit der im Amazonas lebenden Menschen aus, sie beeinflusst vielmehr auch das Klima. So kann der Rauch zu weniger Niederschlag und zu einer Abkühlung an der Erdoberfläche führen.

www.mpg.de/20283390

Eine Rauchschwade aus Afrika mit einer hohen Konzentration an Rußpartikeln erreicht die Küste Brasiliens.



FOTO: MEINRAD O. ANDREAE, MPI FÜR CHEMIE

In mundgerechte Stücke geschnittenes Obst und Gemüse ist bequem zu essen und motiviert Kinder zuzugreifen, wenn die Mahlzeit lange genug dauert.



FOTO: ADOBESTOCK

NÜTZLICHES AUS CO₂

Kohlendioxid aus der Verfeuerung fossiler Brennstoffe in nützliche Substanzen umzuwandeln, könnte den CO₂-Fußabdruck etwa der Chemieindustrie reduzieren. Eine Studie des Max-Planck-Instituts für terrestrische Mikrobiologie zeigt, wie das Treibhausgas über das Zwischenprodukt Ameisensäure zu einem industriellen Wertstoff werden kann. Die Forschenden haben einen künstlichen Stoffwechselweg entwickelt, der die eher reaktionsträge Ameisensäure in reaktiveres Formaldehyd umwandelt, das für die Synthese vieler nützlicher Substanzen, etwa Arzneistoffe, benötigt wird. Dafür haben sie neue Enzymvarianten identifiziert, die die Umwandlung von Ameisensäure in Formaldehyd sehr effizient katalysieren. Genetisch veränderte Mikroorganismen, die mit diesem Stoffwechselweg ausgestattet worden sind, könnten das Formaldehyd künftig zur Herstellung von Produkten wie Insulin oder Biodiesel weiterverwenden.

www.mpg.de/20292012

14

SCHMACKHAFT GEMACHT

Kinder greifen freiwillig zu mehr Obst und Gemüse, wenn sich die Familien mehr Zeit fürs Essen nehmen. Das ist das Ergebnis einer Studie zu Abendessengewohnheiten unter Beteiligung des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung in Berlin. Die teilnehmenden Kinder im Grundschulalter verzehrten deutlich mehr Obst und Gemüse, wenn es mundgerecht geschnitten auf dem Tisch stand

und sie nur zehn Minuten länger dort saßen als sonst – insgesamt etwa eine halbe Stunde. Die Studie ergab zudem, dass längere Familienmahlzeiten nicht dazu führten, dass die Kinder mehr Brot oder Aufschnitt aßen. Die Forschenden vermuten, dass mundgerecht geschnittenes Obst und Gemüse bequem zu essen und daher besonders verlockend ist.

www.mpg.de/20188033

RECYCLING BEIM FASTEN

Auch Zellen kennen das Prinzip des Recyclings: Ihr Abfallentsorgungssystem baut defekte oder beschädigte Moleküle ab und gewinnt aus ihnen Energie. Bisher ging man davon aus, dass die Zellen das Recycling in erster Linie selbst steuern. Doch Forschende des Max-Planck-Instituts für Stoffwechselforschung in Köln haben jetzt an Mäusen herausgefunden, dass das Gehirn bei diesem Pro-

zess eine entscheidende Rolle spielt. In ihrer Studie haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Tiere vier Stunden lang nicht gefüttert. Anschließend untersuchten sie, wie eine bestimmte Gruppe von Nervenzellen im Hypothalamus – dem Hungerzentrum des Gehirns – auf das kurze Fasten reagiert. Überraschenderweise stellten sie fest, dass das Gehirn während des Fastens

nicht nur Signale sendet, die den Organismus zum Essen anregen. Bei niedrigem Energielevel lösen die Nervenzellen auch die Ausschüttung des Hormons Corticosteron aus, das die Zellen der Leber zum Recycling zellulären Abfalls veranlasst. Möglicherweise trägt dieser neu entdeckte Mechanismus im Gehirn zu den positiven Auswirkungen des Fastens bei.

www.mpg.de/20185165

Durchbohrter Hirschzahn aus der Denisova-Höhle in Südsibirien. Forschende haben von seiner Oberfläche uralte menschliche DNA gewonnen.



BILD: MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

SCHMUCK AUS DER EISZEIT

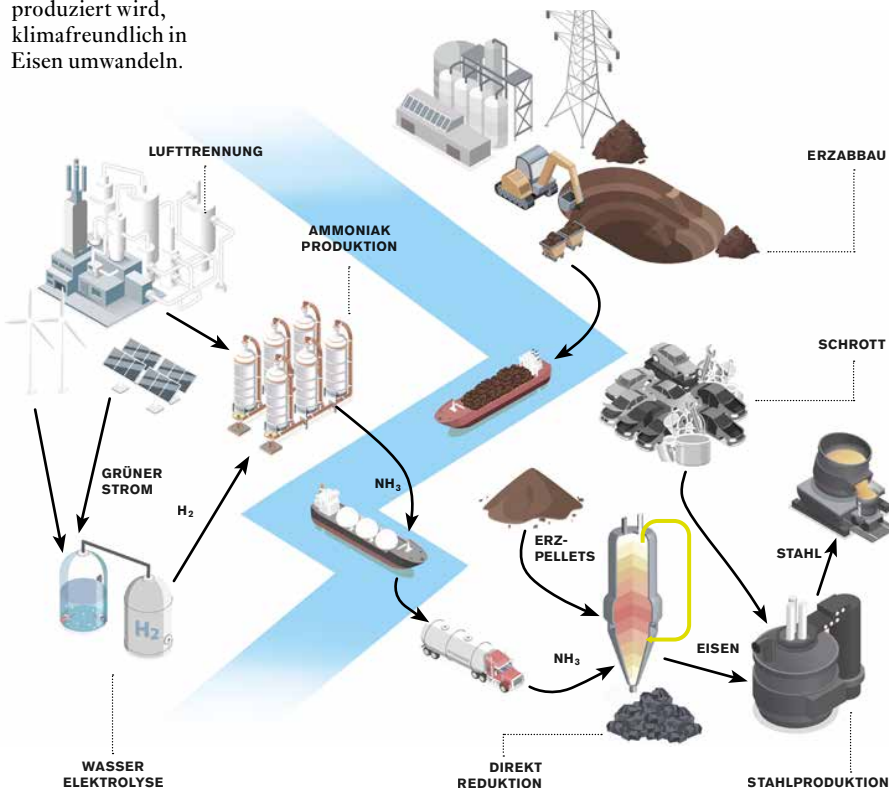
Gegenstände aus Stein, Knochen oder Zähnen liefern wichtige Erkenntnisse über die Lebensweise von Menschen in der Steinzeit. Bislang war es jedoch meist unmöglich, einen solchen Gegenstand einer Person zuzuordnen, die ihn hergestellt oder benutzt hatte. Einem Forschungsteam unter Leitung des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig ist dies nun erstmals gelungen. Die Forschenden haben eine Methode entwickelt, mit der sie die DNA aus alten Knochen und Zähnen auswaschen können, und das sogar, ohne diese zu beschädigen. Auf diese Weise haben sie die DNA aus einem rund 20000 Jahre alten Anhänger aus Hirschzahn, der in Südsibirien gefunden wurde, rekonstruiert. Die Erbgutanalysen ergaben, dass der Anhänger von einem Wapiti-Hirschen stammt und von einer Frau hergestellt, benutzt oder getragen wurde. Diese Frau war genetisch eng verwandt mit Menschen, die zeitgleich in weiter östlich gelegenen Gebieten Sibiriens lebten. Die Ergebnisse demonstrieren, dass sich selbst dann noch Aussagen über die Benutzerinnen und Benutzer von Schmuck und Werkzeugen treffen lassen, wenn die Gegenstände viele Tausend Jahre alt sind.

www.mpg.de/20238006

15

Eisenerz lässt sich durch Direktreduktion mit Ammoniak, der mit grünem Wasserstoff produziert wird, klimafreundlich in Eisen umwandeln.

GRAFIK: ISTOCK; GCO NACH MA, Y., ET AL., REDUCING IRON OXIDE WITH AMMONIA: A SUSTAINABLE PATH TO GREEN STEEL, ADV. SCI. 2023, 10, 2500111



MIT AMMONIAK ZU GRÜNEM STAHL

Wasserstoff ist ein Hoffnungsträger der klimaneutralen Wirtschaft – auch für die Stahlindustrie, die weltweit sieben Prozent der CO₂-Emissionen verursacht. Doch möglicherweise sollte die Branche zumindest in Deutschland auch auf Ammoniak setzen, um grünen Stahl zu erzeugen. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung in Düsseldorf hat

gezeigt, dass Ammoniak Eisenerz ebenso gut wie Wasserstoff in Eisen umwandelt. Ammoniak lässt sich mit grünem Wasserstoff synthetisieren, der etwa in sonnenreichen Ländern gewonnen wird. Das würde sich trotz des zusätzlichen Umwandschritts lohnen, weil Ammoniak viel leichter zu transportieren ist. Wasserstoff oder Ammoniak für eine klima-

neutrale Wirtschaftsweise muss auch in anderen Weltgegenden produziert werden, weil es dafür in Deutschland und anderen mitteleuropäischen Staaten kaum genügend regenerativen Strom geben dürfte – selbst wenn die Energieversorgung aus Wind und Sonne so weit wie möglich ausgebaut wird.

www.mpg.de/20212313

FLÜCHTIGE JUGEND

Wenn junge Menschen ohne Eltern fliehen, ist die wichtigste Frage für deutsche Behörden: Sind die Geflüchteten unter achtzehn oder volljährig? Minderjährige werden unterstützt und versorgt, Volljährige müssen allein ein langwieriges Asylverfahren durchstehen. Ulrike Bialas hat die Situation junger Geflüchteter erforscht. Sie plädiert für einen weniger strikten Umgang mit der Altersfrage.

16

Immer mehr junge Menschen fliehen ohne ihre Familie vor Konflikten, Entrechtung und Armut und stellen in Deutschland einen Asylantrag. 2013 wurden in Deutschland rund 42 000 unbegleitete Minderjährige in Obhut genommen; 2016, im Zuge der sogenannten Flüchtlingskrise, waren es bereits doppelt so viele. Doch viele junge Geflüchtete besitzen keine Identitätsdokumente; einige kennen ihr Geburtsdatum gar nicht. Das Bundesamt für Migration und Flüchtlinge (BAMF) schätzt, dass nur vierzig Prozent aller Asylbewerberinnen und Asylbewerber ihre Identität nachweisen können. Wer aus Afghanistan, Somalia oder Guinea kommt – drei der häufigsten Herkunftsländer unbegleiteter Minderjähriger –, besitzt fast nie entsprechende Dokumente. Deshalb sind die offiziellen Zahlen zu unbegleiteten Minderjährigen in Deutschland nur grobe Schätzungen.

Dabei ist gerade das Geburtsdatum entscheidend für Aufenthaltsstatus und Lebensalltag junger Geflüchteter: Während Minderjährige nicht abgeschoben werden dürfen, in der Jugendhilfe untergebracht sind und von einem Vormund begleitet werden, verbringen Erwachsene ihre ersten Monate oftmals in Angst vor einer sogenannten Dublin-Überstellung. Das bedeutet, dass sie in das EU-Land ihrer ersten Einreise abgeschoben werden. Viele wohnen jahrelang in Gemeinschaftsunterkünften und haben im Falle eines abgelehnten Asylantrags kaum aufenthaltsrechtliche Alternativen. Wie aber entscheiden deutsche Behörden, wenn keine Geburtsurkunde vorhanden ist, wer als Minderjähriger aufenthaltsrechtlich bevorteilt und in der Jugendhilfe betreut wird? Und wie leben junge Geflüchtete selbst mit ihrer Einstufung als minderjährig oder erwachsen? →

ZUR SACHE

ULRIKE
BIALAS



ILLUSTRATION: SOPHIE KETTERER FÜR MPG

Ulrike Bialas ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Max-Planck-Institut zur Erforschung multireligiöser und multiethnischer Gesellschaften in Göttingen. Sie promovierte im Fach Soziologie an der Princeton University. Ihr Buch *Forever 17: Coming of Age in the German Asylum System* erscheint im Dezember bei University of Chicago Press.

MENSCHEN
ENTWICKELN
SICH ZWAR
ÄHNLICH,
ABER NICHT
IM GLEICHEN
TEMPO

Diese Fragen habe ich ethnografisch, also in teilnehmender Beobachtung, untersucht. Die teilnehmende Beobachtung ist eine Methode der qualitativen Sozialforschung, die besonders für die Kulturanthropologie, aber auch für die Soziologie – meine Heimatdisziplin – unentbehrlich ist. Dabei geht es darum, Menschen über einen längeren Zeitraum, oft über Jahre, in ihrem Alltag zu begleiten und so mit ihren Gewohnheiten, Werten und Problemen vertraut zu werden. Im besten Fall entwickelt sich mit der

Zeit ein Vertrauensverhältnis zwischen Forschenden und Teilnehmenden, das es ermöglicht, auch über heikle Themen offen zu sprechen. Anders als in langjähriger teilnehmender Beobachtung kann man aus meiner Sicht die umstrittenen Alter junger Geflüchteter nicht erforschen. Dass das Alter zum Beispiel je nach Kontext und Situation eine unterschiedliche Bedeutung annehmen kann, sieht man eben nur, wenn man es wirklich in unterschiedlichen Kontexten und Situationen betrachtet.

Zunächst habe ich an einem forensischen Institut sogenannte Altersschätzungen beobachtet, in denen Fachleute für Altersdiagnostik radiologische Aufnahmen auswerten, um anhand der Knochenbildung Rückschlüsse auf das chronologische Alter zu ziehen. Um mehr über den rechtlichen Kontext unbegleiteter Minderjähriger zu erfahren, habe ich dann bei einem Verein gear-

beitet, der ehrenamtliche Vormünder an unbegleitete Minderjährige vermittelt. Schließlich habe ich mehrere Jahre mit einer Gruppe junger Geflüchteter – offiziell Minderjährige sowie offiziell junge Volljährige – verbracht. Ich habe sie im Camp und in der Jugendwohngruppe besucht, beim Deutschlernen und bei Schulaufgaben unterstützt, ihre Freunde und Bezugspersonen kennengelernt und sie zu Behörden wie dem BAMF, der Ausländerbehörde, dem Familiengericht oder dem Jugendamt sowie zu Terminen im Krankenhaus, in der Anwaltskanzlei oder Asylberatung begleitet.

Meine Forschung hat gezeigt, dass das Lebensalter komplex ist. Weil Gesetze, etwa aus dem Aufenthalts- und Jugendhilferecht, jedoch auf den Tag genau zwischen Minderjährigen und Erwachsenen unterscheiden, müssen Behörden Geburtsdaten festlegen. Dabei können Altersschätzungen lediglich Spannen und Wahrscheinlichkeiten ermitteln, da Menschen sich zwar ähnlich, aber eben nicht im gleichen Tempo entwickeln, gerade wenn sie unter ganz unterschiedlichen Bedingungen aufwachsen. Obwohl die forensisch ermittelten Alter also lediglich Schätzungen sind, entscheiden sie darüber, ob und unter welchen Bedingungen ein junger Mensch in Deutschland leben darf.

Geflüchtete, die als junge Erwachsene eingeschätzt werden, leben in hoher aufenthaltsrechtlicher Unsicherheit. Sie dürfen lediglich in Ausnahmefällen Regelschulen besuchen, erfahren ohne Jugendhilfe kaum Unterstützung und finden in ihren Gemeinschaftsunterkünften selten die nötige Ruhe und Privatsphäre zum Erholen oder Lernen. Aber auch minderjährige Geflüchtete haben es schwer. Während sie in ihren Heimatländern oft

DERZEIT WIRD
SO MANCHE
UNBEUGSAME
KATEGORIE
WIRKSAM
HINTERFRAGT

schon viel Verantwortung innerhalb ihrer Familie übernommen haben, werden sie nun bevormundet und müssen in der Jugendhilfe Regeln und Kontrolle akzeptieren. Ihre Sozialhilfeleistungen werden wöchentlich zugeteilt und ihre Ausgaben geprüft, im betreuten Wohnen gibt es Ausgangssperren und Zimmerkontrollen, und die Betreuungspersonen werden durch Anwältinnen, Lehrer, Ärztinnen und Psychotherapeuten selbst über private Details informiert – um nur einige der üblichen Erziehungsmaßnahmen zu nennen. Nicht zuletzt mussten die jungen Geflüchteten auf der Flucht oftmals schon sehr erwachsen agieren. Die Selbstständigkeit, die sie dabei entwickelt haben, können sie in der Jugendhilfe nicht mehr ausleben. Mitunter wird sie ihnen sogar vorgehalten und damit unterstellt, dass sie – so autonom und reif – in Wahrheit gar nicht minderjährig seien.

Das Lebensalter erscheint zunächst als eindeutige und faire Kategorie. Aber meine Forschung zeigt, dass es nicht eindeutig bestimmt werden kann und vielleicht auch gar nicht die beste Maßeinheit für Hilfebedarf ist. Die jungen Geflüchteten, die ich begleitet habe, haben in ihren Herkunftsländern eine ganz andere Kindheit verbracht als die, die Heranwachsende in Deutschland auf das Erwachsenenleben hier vorbereitet. So haben sie etwa früh im Haushalt geholfen und ihre Eltern finanziell oder bei der Erziehung jüngerer Geschwister unterstützt, aber – wie sie selbst sagen – nicht gelernt, eigene Entscheidungen zu treffen, Lebens- und Berufswege zu planen. Hinzu kommt die große Aufgabe, das Trauma der Flucht zu verarbeiten und sich im neuen Land ohne den Rückhalt der Familie zurechtzufinden.

Natürlich sollten die Methoden der Altersschätzung weiter verbessert werden, schon allein um keine Minderjährigen als erwachsen einzustufen. Darüber hinaus müssen wir aber vielleicht lernen, mit Ambiguität zu leben. Alle Fachleute, mit denen ich gesprochen habe, waren sich trotz ihrer politischen und fachlichen Widersprüche in einem einig: Wir werden nie genau wissen, wie alt junge Menschen, die ohne Identitätsdokumente nach Deutschland kommen, wirklich sind. Das ist eine rechtliche und bürokratische Herausforderung, aber vielleicht auch eine Chance. Wir leben schließlich in einer Zeit, in der viele bislang scheinbar unbeugsame Kategorien wirksam hinterfragt werden. Die Migration junger Geflüchteter „ohne Alter“ könnten wir zum Anlass nehmen, uns ähnlich kritisch mit der Bedeutung von Jugend auseinanderzusetzen. Minderjährige erhalten besondere Unterstützung, weil sie einerseits schutzbedürftig und andererseits offen für Neues sind. Sie zu fördern ist eine ebenso notwendige wie kluge gesellschaftliche Investition. Sollten also nicht besser Schutzbedürftigkeit und Offenheit statt eines bestimmten Geburtsdatums die entscheidenden Kriterien sein, aufgrund derer wir junge Menschen in unsere Gesellschaft aufnehmen? Eine Debatte um diese Begriffe wird nicht weniger schwierig sein, als es die Bestimmung von Geburtsdaten derzeit ist. Aber sie ist der Mühe wert.

←

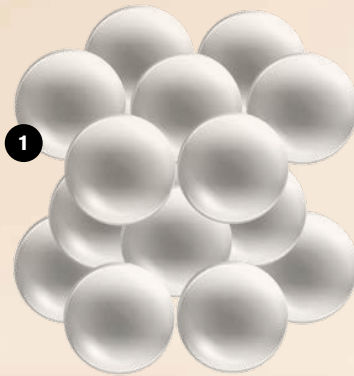
EINE WELT VOLLER SECHSECKE

Die Natur hat einen Sinn für Symmetrie, und manche Formen scheint sie zu bevorzugen. Neben Kreisen und Kugeln sind das etwa Sechsecke. Sie finden sich nicht nur in Bienenwaben und Schneeflocken, sondern auch in Kristallen, in Salzwüsten oder im Permafrost. Dabei sind die Prozesse, in denen sie entstehen, sehr unterschiedlich.



ENERGIESPARSAM

Die Natur minimiert in vielen Fällen das Verhältnis von Umriss zu Flächeninhalt und von Oberfläche zu Volumen. Daher schweben Öltropfen kugelförmig in Wasser. In der dichtestmöglichen Anordnung von Kugeln oder Kreisen sind diese in einer Ebene jeweils von sechs Nachbarn umgeben. So sind etwa die atomaren Schichten der Kugelpackung, in der viele Metalle kristallisieren **1**, hexagonal aufgebaut. Wenn Kreise in einer hexagonalen Anordnung dichter zusammengeschoben werden und sich die Lücken zwischen ihnen schließen, verformen sich die Kreise zu Sechsecken. Bei Bienenwaben **2** ist nicht nur die Struktur besonders stabil, die Bienen benötigen dafür auch am wenigsten Wachs.



20

WÜLSTE IN DER WÜSTE

Im Untergrund von Salzwüsten gibt es Wasser, das sich in Konvektionsrollen bewegt, wie Forschende unter anderem des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation herausgefunden haben: Leichtes, salzarmes Wasser (grau) steigt an die Oberfläche, ein Teil davon verdunstet, und salzreiches Wasser (braun) sinkt wieder ab. Mehrere Konvektionsrollen nebeneinander formen eine Wabenstruktur. An den Grenzflächen der Sechsecke, wo das Salzwasser nach unten sinkt, ist der Salzgehalt so hoch, dass Salz an der Oberfläche auskristallisiert und Wülste bildet.



SPANNUNGRISSE

In austrocknendem Boden **3**, langsam abkühlendem Basalt **4** sowie im Permafrostboden während besonders kalter Winter **5** entstehen Risse, die im Idealfall eine Wabenstruktur haben, weil so die Spannung am effizientesten abgebaut wird. Im Permafrost füllen sich die keilförmigen Spannungsrisse im nächsten Frühjahr mit Wasser. In dem Prozess, den auch das Alfred-Wegener-Institut erforscht, bildet das Wasser beim Gefrieren unterirdische Eiswaben.

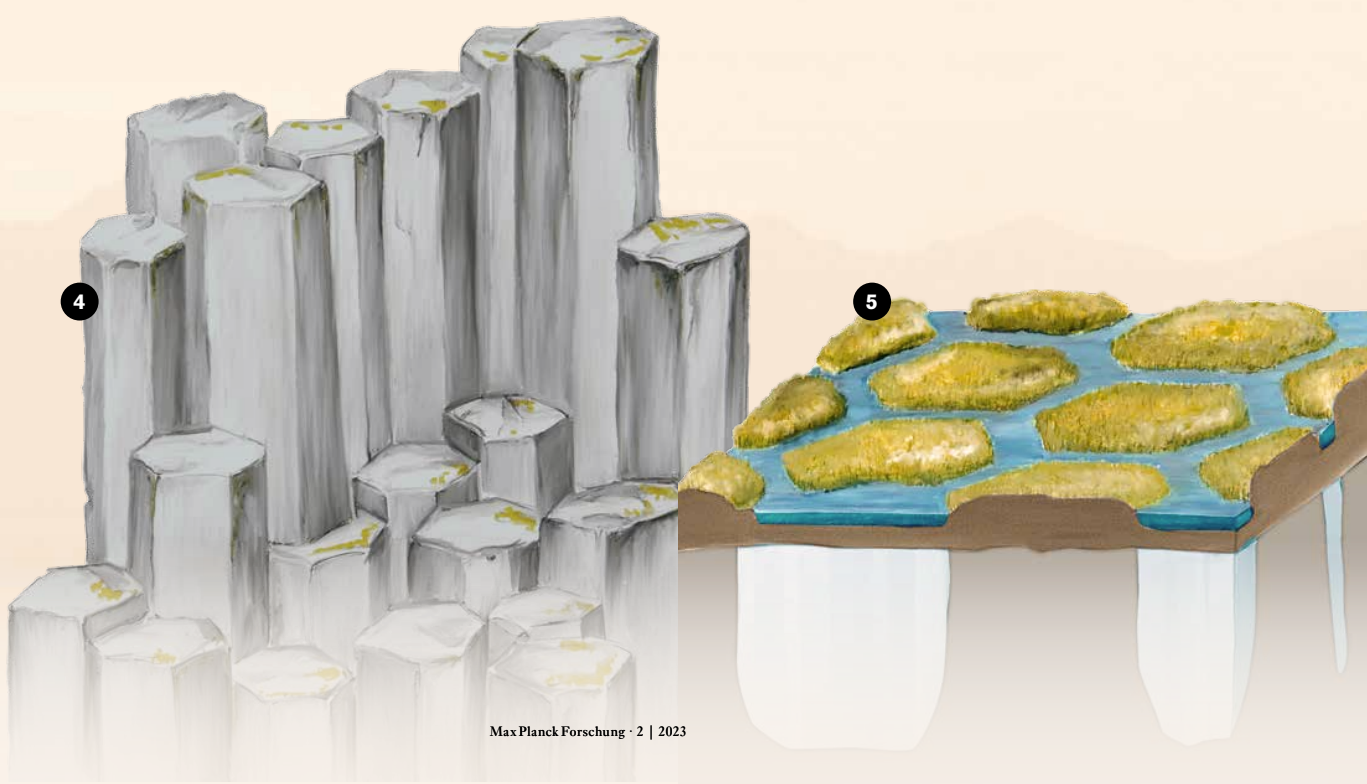




VARIATIONEN IN SECHS RICHTUNGEN

Das Wassermolekül aus einem Sauerstoff- und zwei Wasserstoffatomen ist gewinkelt gebaut. Wenn sich die Wassermoleküle zu Eiskristallen vernetzen, ist die sechseckige Struktur die effizienteste. Welche Form Eiskristalle im Detail annehmen, hängt von den Bedingungen ab, bei denen sie wachsen, etwa Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Ein einzelner Kristall wächst in alle sechs Richtungen symmetrisch, weil für diese die gleichen Bedingungen herrschen.

21



IM FOKUS

WELTEN BEWEGEND

22 | AUS STAUB GEBOREN

30 | MADAGASKAR GREIFT NACH DEN STERNEN

36 | TANZ DER SCHWARZEN LÖCHER

Alles dreht sich: Die künstlerische Darstellung zeigt, wie Planeten durch Kollisionen von immer größer werdenden Körpern in einer Staub- und Gasscheibe um einen neu geborenen Stern entstehen.

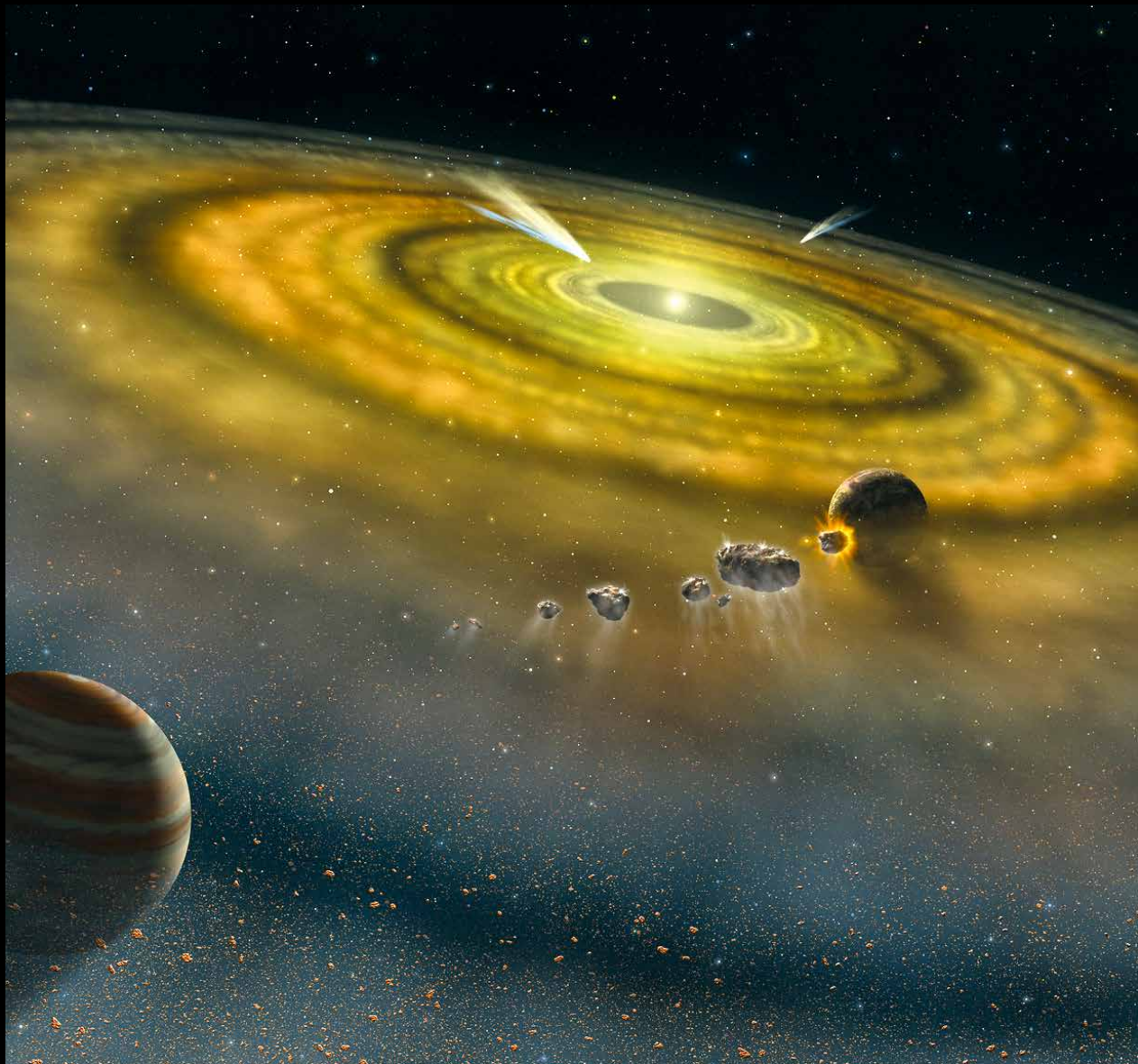


BILD: NASA/FUSE/LYNETTE COOK

AUS STAUB GEBOREN

TEXT: THORSTEN DAMBECK UND TOBIAS BEUCHERT

Das Leben auf der Erde, wie wir es heute kennen, ist vielen Zufällen zu verdanken – und dem Planeten Jupiter. Seine gewichtige Rolle im Sonnensystem ist ein Aspekt von dessen bewegter Geschichte, die Thorsten Kleine und Joanna Drażkowska vom Göttinger Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung anhand von Meteoriten und Computersimulationen untersuchen.

Am 12. September 2019 erlebten Augenzeugen ein himmlisches Spektakel: Kurz vor 15 Uhr raste eine Feuerkugel über den Himmel Mitteleuropas. Mancherorts löste der Meteor sogar ein Donnergrollen aus. Kamerabilder und Videos dokumentierten das Ereignis, Presse und Fernsehen berichteten. So erklärt es sich wohl, dass bereits am Folgetag bei Gartenarbeiten in Flensburg ein verdächtiges graues Steinchen vom Format eines Golfballs geborgen wurde. Es ist das bislang einzige Fragment des „Flensburg-Meteoriten“. Das kosmische Fundstück in Norddeutschland mag spektakulär erscheinen – doch Meteoritenfunde sind keineswegs selten. „In Sammlungen weltweit lagern mehr als 70 000 Steine, die irgendwann vom Himmel gefallen sind“, erläutert Thorsten Kleine. Seit 2021 arbeitet er als Direktor am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung und leitet dort die Abteilung für Planetenwissenschaften.

Meteorite sind Bruchstücke unter anderem von Asteroiden, die heute in einem Band zwischen Mars und Jupiter die Sonne umkreisen. Neben den kleinen Körpern finden sich im Sonnensystem zwei Planetentypen: Nah der Sonne kreisen die Gesteinsplaneten, meist werden sie terrestrische Planeten genannt. Sie haben relativ geringe Massen, aber hohe Dichten. Es handelt sich um Merkur, Venus, Erde und Mars. Beim zweiten Typ handelt es sich um die Schwergewichte der Gas- und Eisriesen, die jenseits des Mars um die Sonne kreisen. Man unterscheidet die Gasriesen Jupiter und Saturn hinter Mars und die Eisriesen Uranus und Neptun am sonnenfernen Rand des Sonnensystems. Die Begriffe der Gas- und Eisriesen beziehen sich dabei nicht auf den heutigen Zustand der Planeten, sondern auf ihre Entstehungsgeschichte. Das Gemisch aus Wasserstoff und Helium, das sich während des Wachstums der Planeten um diese herum ansammelte, war in dieser Phase rein gasförmig. Durch deren großes Eigengewicht und den hohen Druck des angesammelten Gases wurden Wasserstoff und Helium in den tieferen Schichten der Gasriesen flüssig, in der äußeren Atmosphäre blieben sie dagegen gasförmig. Uranus und Neptun unterscheiden sich von den Gasriesen dadurch, dass sie während ihrer Entstehung zusätzlich Wasser, Methan und Ammoniak in gefrorener Form an sich banden. Auch diese liegen heute im Inneren der Planeten größtenteils flüssig vor.

Aber wie sind die Planeten unserer kosmischen Heimat, des Sonnensystems, entstanden? Im klassischen Kollisionsmodell, das bislang weithin akzeptiert war, entstanden Planeten durch „oligarchisches Wachstum“ in einer Staub- und Gasscheibe, der „protoplanetaren Scheibe“, um die neu geborene Sonne. Demnach ballte sich der Staub zu immer größeren Konglomeraten zusammen, bis sich die sogenannten Planetesimale bildeten. Man kann sich diese ersten Urkörper der Planeten ähnlich den heutigen Asteroiden vorstellen. Durch weitere Zusammenstöße wuchsen daraus Körper von den Ausmaßen etwa unseres Mondes bis hin zu jenen des Mars heran. Aus den noch gewaltigeren Kollisionen dieser Planetenembryos gingen schließlich, so mutmaßen Forschende, die heutigen Planeten hervor.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Unsere Planeten entstanden vor 4,6 Milliarden Jahren aus einer Gas- und Staubscheibe um die neu geborene Sonne.

Neue Analysen von Meteoriten, den Zeugen der Entstehungszeit, und Computersimulationen der Vorgänge in der Scheibe erklären, wie sich aus Staub und Gas die Planeten gebildet haben könnten.

Die Gasplaneten entstanden, indem sich durch das Einströmen und Verklumpen kieselartigen Materials (Pebbles) aus dem äußeren Sonnensystem zunächst ihre festen Kerne bildeten. Diese zogen Wasserstoff und Helium an, aus denen die Planeten größtenteils bestehen.

Mit seiner Anziehungskraft verhindert Jupiter starken Beschuss der Erde durch Asteroiden und sorgt damit auch für die Bedingungen, unter denen sich hier Leben entwickeln konnte.

Thorsten Kleines Team testet diese Hypothese im Labor, und zwar mittels Meteoriten, also Gesteinbröckchen, die – wie damals in Flensburg – auf die Erde gestürzt sind. „Die Meteorite enthalten Hinweise auf ihren Entstehungsort, ihre Entwicklung und ihr Alter“, so Kleine. Meteorite sind das wohl älteste bekannte Gestein und etwa so alt wie das Sonnensystem selbst. Es sind die Überreste jenes Materials, aus dem sich damals die Planeten bildeten. Wenn Forscherinnen und Forscher Meteorite analysieren, begeben sie sich also auf eine Zeitreise und erhalten einen indirekten Einblick in die Entstehung des Sonnensystems. Aus der Analyse der Meteoriten lernen sie, wie sich das Baumaterial im frühen Sonnensystem verteilte. Dieses Wissen hilft dann, den Entstehungsort der Planeten zu bestimmen – der erste Schritt, um ihre Geschichte zu rekonstruieren.

Kleine und sein Team suchten nach einer Eigenschaft, die verrät, aus welchem Teil der protoplanetaren Scheibe ein Meteorit stammt. Ein solches Kriterium sollte etwas wie der Fingerabdruck eines Menschen sein,

der sich während des Lebens nicht verändert. Die chemische Zusammensetzung der Meteoriten allein, also die Häufigkeit von Elementen wie Eisen, Silizium oder Sauerstoff, gibt nur ungenaue Hinweise auf den Ursprungsort der Himmelskörper, da die Elemente in der frühen Scheibe stark vermischt waren.

Thorsten Kleine fand jedoch heraus, dass sich die Isotopenverhältnisse von Elementen wie Eisen, Molybdän oder Chrom als Signatur des Entstehungsorts eignen.



FOTO: SWEN PRÖRTNER FÜR MPG

Auswahl aus der Meteoritensammlung des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung: Die größten der Körper messen mehr als 20 Zentimeter. Die meisten von ihnen gehören zur häufigsten Klasse der Gesteinsmeteorite, die größtenteils aus Silikaten bestehen. In der Mitte unten ist ein Schnitt durch einen solchen Meteoriten zu sehen. Der Schnitt rechts stammt von einem Eisen-Nickel-Meteoriten, wie er oben links abgebildet ist.

„Weltweit lagern mehr als 70 000 Steine, die vom Himmel gefallen sind.“

THORSTEN KLEINE

Isotope sind Varianten ein und desselben chemischen Elements mit leicht verschiedenen Massen. Schon in der Molekülwolke, aus der zunächst unsere Sonne und die protoplanetare Scheibe und dann die Planeten entstanden, waren die Isotope dieser Elemente offenbar nicht gleichmäßig verteilt. Vielmehr muss es je nach Abstand zum Zentrum der Wolke schon damals Unterschiede in den Isotopenverhältnissen gegeben haben. Dement-

sprechend entstanden die damals noch wachsenden planetaren Körper aus Baumaterial mit unterschiedlichen Isotopenzusammensetzungen, abhängig davon, ob sich das Material nah oder fern der Sonne zusammenballte. Milliarden Jahre später lassen sich die Isotope immer noch wie Spuren der damaligen Verteilung des planetaren Baumaterials lesen. „Das Verhältnis bestimmter Isotope ist ein hervorragender Marker, um Meteorite bezüglich ihrer Entstehungsorte zu unterscheiden“, erklärt Thorsten Kleine. Dabei gibt es zwei Gruppen: die nicht kohligten und die kohligten Meteorite. Diese entstammten zwei unterschiedlichen Reservoirs in der frühen Gas- und Staubscheibe des Ursonnensystems: die nicht kohligten dem inneren und die kohligten dem äußeren Teil der Scheibe. Ihre Benennung ist historisch gewachsen und, anders als der Name vermuten lässt, unabhängig vom Kohlenstoffgehalt des Gesteins. „Die Aufspaltung in zwei Reservoirs haben wir an den Isotopen des Molybdäns erstmals belegt. Die beiden unterschiedlichen Gruppen von Meteoriten existierten offenbar von



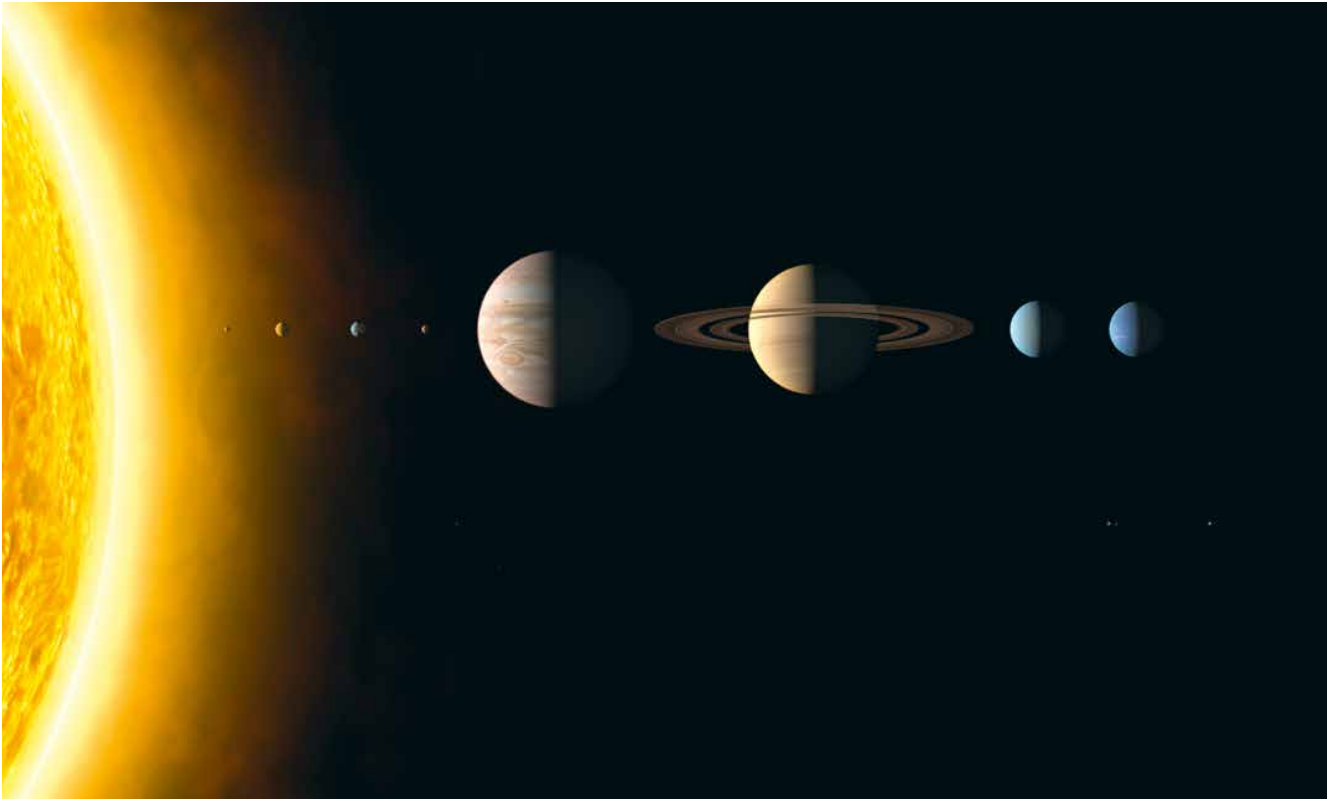


BILD: THE INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION/MARTIN KORNMESSE

In Reih und Glied: Die Planeten unseres Sonnensystems, dargestellt im richtigen Größenverhältnis zueinander, jedoch nicht im wahren Abstand zur Sonne. Von links nach rechts: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.

26

Beginn an“, sagt Kleine. Um bei den Analysen am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung auszuschließen, dass die Gesteinsproben verunreinigt und so die Messergebnisse verfälscht werden, müssen die Forschenden unter hochreinen Bedingungen arbeiten. Zunächst pulverisieren sie die Proben und bereiten sie dann, teils wochenlang, chemisch vor. Mit hochpräzisen Massenspektrometern in der Größe eines Kleinwagens lassen sich dann Unterschiede in den Mengenverhältnissen der Isotope in den Proben sehr präzise bestimmen.

Eine Frage, zwei Theorien

Vergleicht man die Isotopenverhältnisse in Meteoritenproben bekannten Ursprungs in der protoplanetaren Scheibe mit denen in Planetengestein, lässt sich mutmaßen, wo das Baumaterial eines Planeten entstanden sein könnte. Bisher gab es keinen Grund, an dem klassischen Kollisionsmodell zu zweifeln, das erklären soll, wie im frühen Sonnensystem Planeten Gestalt annahmen. Der Blick auf die äußeren Gasriesen allerdings brachte das Fundament dieses Modells zum Bröckeln. Dazu trägt auch Joanna Drazkowskas Forschung bei. Während Thorsten Kleine die direkten Boten des Ursonnensystems im Labor aufbereitet und aufwendig

untersucht, geht die Gruppenleiterin am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung andere Wege, um die Geschichte unseres Planetensystems zu entschlüsseln. Ziel ihrer Arbeitsgruppe ist es, das anfängliche Verklumpen des Staubes im flachen Materiestrom um die junge Sonne am Computer zu simulieren: „Wir wollen die grundlegenden Prinzipien der frühen Planetenbildung entschlüsseln. Andere Modelle sparen diese Anfangsphase zumeist aus“, erklärt Drazkowska. Ein besonderes Augenmerk legt die Wissenschaftlerin dabei auf das Wachstum von Jupiter – ein Gasriese und Platzhirsch unter unseren Planeten. Obwohl Jupiter zum Großteil aus Wasserstoff und Helium besteht, vermutet man in seinem Inneren einen soliden Kern von zehn bis zwanzig Erdmassen. Dies war auch die notwendige Masse, damit ein Körper in den Anfängen des Sonnensystems über die eigene Schwerkraft Gas aus der protoplanetaren Scheibe an sich binden konnte. Laut den Computermodellen musste sich dieser Kern Jupiters aber relativ schnell innerhalb der ersten Jahrmillionen bilden, um genügend von dem umliegenden Gas anzuziehen, bevor dieses sich anderweitig verteilen konnte. Im klassischen Wachstumsmodell der Planeten hätte es zu lange gedauert, Jupiters Kern zu bilden, da sich die darin postulierten Kollisionen größerer Himmelskörper relativ selten ereigneten. Folglich musste ein anderer Wachstumsmechanismus gefunden werden.

Eine neuere Theorie könnte die schnelle Entstehung des Jupiterkerns erklären. Demnach trugen kleine Klümpchen aus kosmischem Staub, die vornehmlich aus den kalten Regionen fernab der Sonne entstammten, zum Wachstum bei. Im Fachjargon werden sie Pebbles genannt. Durch Reibung und Stöße innerhalb der ursprünglichen Gas- und Staubscheibe verloren sie Energie, die sie auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne hielt. Daher wanderten sie in Richtung des Zentralsterns und trafen auf bereits vorhandene Planetesimale. Da diese Myriaden von Pebbles ansogen, wuchsen sie sehr schnell. „Was die Kerne der Gas- und Eisriesen betrifft, wird heute wohl jeder dem Pebbles-Modell zustimmen“, so Kleine. Schnell stellt sich die Frage, ob auch das Baumaterial von Erde und Mars aus Regionen fernab der Sonne angeliefert wurde und ob die bisherige Vorstellung des klassischen, oligarchischen Wachstums, gänzlich überholt ist.

Um das zu beantworten, untersuchte ein internationales Team um Christoph Burkhardt, ebenfalls Teil des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung, und Thorsten Kleine siebzehn Bruchstücke des Roten Planeten sowie Material der Erdkruste genauer. Die Forschenden verglichen dieses Planetenmaterial mit Proben von Meteoriten, die nachweislich aus dem äußeren Sonnensystem stammen. Hierfür analysierten sie die isotopischen Spuren von drei seltenen Metallen, und zwar Titan, Zirkonium und Molybdän. Die Ergebnisse bestätigten die ursprüngliche Annahme, dass Erde und

Mars nur wenig mit dem Material aus dem äußeren Sonnensystem gemeinsam haben. Der Anteil von außen beträgt jeweils nur rund vier Prozent. „Hätten die Vorgängerkörper von Erde und Mars hauptsächlich Staubkörnern aus dem äußeren Sonnensystem angesammelt, müssten die Werte fast zehnfach höher liegen“, so Thorsten Kleine. Das Baumaterial beider Planeten sei quasi vor Ort angeliefert worden – aus dem inneren Sonnensystem. Das oligarchische Wachstum als klassisches Modell passe im Falle der terrestrischen Planeten immer noch sehr gut.

Bote aus der Ferne

Doch nicht alles, was sich im inneren Sonnensystem tummelt, ist dort entstanden. Ein internationales Forschungsteam, dem auch Kleine angehörte, untersuchte krümeliges Probenmaterial, das die japanische Sonde Hayabusa 2 im Dezember 2020 vom Asteroiden Ryugu zur Erde gebracht hatte. Ryugu ist ein Brocken in der Form einer Doppelpyramide und misst etwa einen Kilometer im Durchmesser. Er befindet sich heute auf einer sonnennahen Umlaufbahn ähnlich wie die Erde. Die Probe bestand nur aus 5,4 Gramm Material, was aber ausreichen sollte, um nachzuweisen, wo Ryugu ursprünglich entstanden ist. Hierfür verglich das Team die Probe von Ryugu mit denen mehrerer Meteorite, von denen die Isotopensignatur und damit die Herkunft in der frühen protoplanetaren Scheibe bekannt waren.

27



Forschung hautnah: Die Astronomin Joanna Drążkowska diskutiert die Details ihrer Modelle im Team (links). Thorsten Kleine analysiert Meteorite im Labor unter hochreinen Bedingungen und mit modernster Technik (rechts).



FOTOS: SWEN PFÖRTNER FÜR MPG

Die Eisenisotopenverhältnisse von Ryugu ähneln dabei denen einer Klasse seltener Meteorite, die ähnlich wie die kohligten Meteorite aus dem äußeren Sonnensystem stammen. Folglich ist Ryugu ein Wanderer, der seine Reise ins innere Sonnensystem einst fernab der Sonne begann. Solche Studien lassen vermuten, dass Material aus dem äußeren Sonnensystem durchaus den Weg in die Nähe von Erde und Mars gefunden hat.

Jupiter macht den Unterschied

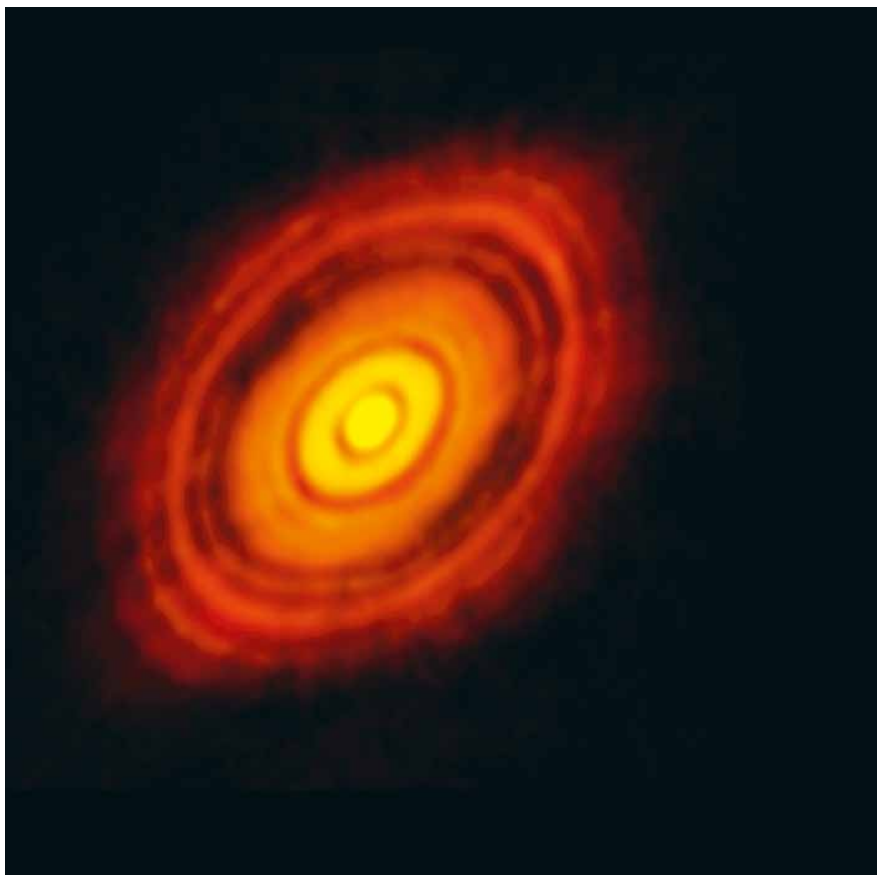
Die Untersuchungen der Relikte aus der Frühzeit unseres Sonnensystems durch ihren Kollegen Thorsten Kleine sind ein wichtiger Baustein der Computersimulationen von Joanna Drazkowska. Diese sind unerlässlich, um die Entstehung der Gasriesen zu verstehen, deren Gesteinskerne tief unter einer undurchdringlichen Schicht verborgen liegen und keine direkte Beprobung erlauben. Damit Jupiter wachsen konnte, brauchte es nach ihren Berechnungen viel Staub, genauer ein Staub-zu-Gas-Verhältnis von etwa eins zu eins. Diese spezielle Bedingung war an der sogenannten Eislinie gegeben, wie die Forscherin herausgefunden hat. In diesem Abstand zur Sonne war Wasser zu Eis gefroren, und tatsächlich findet man Jupiter heute in der Nähe dieser gedachten Linie. „An der Eislinie war die Staubkonzentration hoch genug, dass sich effektiv und schnell Pebbles zu Planetesimalen vereinten“, so Drazkowska.

Schnell verstanden Kleine, Drazkowska und ihre Teams auch, warum sich die zwei Gruppen von Meteoriten zwischen der inneren und äußeren protoplanetaren Scheibe des jungen Sonnensystems nicht vermischten. Bereits während der ersten Million Jahre formte sich der Planet Jupiter, indem er große Mengen von Staub und Gas anzog, welches aus dem äußeren Sonnensystem in Richtung Sonne strömte. „Jupiter spielte eine zentrale Rolle für die Bildung unseres Sonnensystems“, so Kleine. Seine enorme Masse verhinderte ein Durchmischen des Baumaterials und führte zu einem masseverarmten inneren Sonnensystem. Aber auch bis heute bildet Jupiter eine natürliche Barriere gegen Beschuss von außen und trägt daher einen großen Anteil an der Entstehung vor allem höheren Lebens auf der Erde. Denn er verringert die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Asteroiden auf der Erde einschlagen und ein Massensterben wie im Fall der Dinosaurier auslösen. „Ohne Jupiter wäre die Erde wohl zudem zu einer Supererde mit dem mehr als Zehnfachen der heutigen Masse angewachsen“, sagt Thorsten Kleine. Und auf einem Planeten mit so großer Masse sähe das Leben zumindest ganz anders aus als auf der Erde. Dass Jupiter den Zustrom planetarem Baumaterials begrenzte, erklärt auch, warum es 150 Millionen Jahre dauerte, bis beispielsweise die Erde ihre heutige Masse er-

reichte. Ohne den Zustrom von Pebbles wuchsen die inneren Gesteinsplaneten nämlich entsprechend dem klassischen Modell vergleichsweise langsam durch das Zusammenprallen von Mond- bis Mars-großen Körpern vor Ort.

Ryugu, der im äußeren Sonnensystem entstand und sich heute in der Nähe der inneren Planeten aufhält, widerspricht diesem Bild dabei keineswegs. Der Asteroid ist wie der Großteil der Asteroiden wohl erst vor relativ kurzer Zeit durch das Zusammenwirken der Schwerkraft der verschiedenen Körper des Sonnensystems dorthin gewandert, wo wir ihn heute finden. Und das Kräftespiel, das von Jupiter dominiert wird, hält die Asteroiden, also die Überreste der frühen Planetenentstehung und gewissermaßen die Steinbrüche für Meteorite, nun auch in einem Gürtel zwischen Mars und Jupiter.

Planetenenstehung live: Diese Aufnahme des Alma-Teleskops zeigt eine Staubscheibe um den jungen Stern HL Tauri, in der womöglich gerade Planeten entstehen. Die dunklen Ringe könnten daher stammen, dass die jungen Planeten auf ihrer Bahn um den Stern Staub einsammeln.



Laut Joanna Drazkowska sei die Bildung der Planeten des Sonnensystems oder anderer Planetensysteme in der Milchstraße jedoch längst noch nicht gänzlich verstanden: „Ein umfassendes und detailliertes Modell, das alle Phasen und Prozesse der Planetenentstehung vereint, gibt es bislang nicht“, sagt die Forscherin. Umso mehr interessiert sie sich für einen Realitätsabgleich ihrer Computersimulationen, der über die direkte Beprobung unseres Sonnensystems hinausgeht. Da anzunehmen ist, dass die grundlegenden Abläufe der Planetenentstehung in der gesamten Milchstraße denselben physikalischen Grundsätzen folgen, richtet Drazkowska ihren Blick auch in den Nachthimmel.

„Jupiters Kern muss sich relativ schnell innerhalb der ersten Jahrmillionen ausgebildet haben.“

JOANNA DRAŻKOWSKA

Moderne Teleskope gewähren Blicke auf ganz verschiedene Planetensysteme, die in verschiedenen Entfernungen zu unserer Heimat liegen und noch dazu unterschiedlich alt sind. Manche davon befinden sich in einem frühen Stadium wie unser Sonnensystem vor rund 4,6 Milliarden Jahren. Den ersten Hinweis auf ein solches sehr junges System erlangten Astronominnen und Astronomen in den 1990er-Jahren im Orionnebel. Diese aktive Geburtsstätte neuer Sterne und damit auch neuer Planetensysteme ist von unseren Breiten aus vor allem in den Wintermonaten schon mit einem Feldstecher zu bestaunen. Auf Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops entdeckte man einige seltsam aussehende Sterne: Ihre Lichtflecke schienen vor dem Hintergrund des schwach leuchtenden Nebels zwei dunkle seitliche Ausbuchtungen zu zeigen. Erstmals waren damit Bilder von protoplanetaren Gas- und Staubscheiben und somit ein Blick auf die Bühnen der Planetenentstehung gelungen. Mittlerweile hat man viele weitere solcher Planetenwiegen gefunden. Bestens eignet sich hierfür das Alma-Teleskop (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) in Chile, das kurze Radiowellen einfängt und die Staubscheiben in bisher unerreichtem Detailreichtum abbildet. In den Aufnahmen vieler dieser Scheiben sind Lücken sichtbar, die von jungen Planeten erzeugt werden könnten.

Andere Planetensysteme, die sich mit eigens optimierten Teleskopen aufspüren lassen, sind bereits ausgewachsen. Seit 1995 in über 51 Lichtjahren Erdabstand der erste extrasolare Planet um einen Stern in der Konstellation Pegasus aufgespürt wurde, folgte eine Flut ähnlicher Entdeckungen. Mehr als 5000 dieser Exoplaneten-Systeme haben Astronominnen und Astronomen inzwischen entdeckt. Die Eigenschaften mancher Systeme wirken exotisch, etwa ihre verglichen mit dem Sonnensystem verdrehte Architektur, in der sich die größten Gasplaneten besonders nah am Zentralstern befinden. Laut Thorsten Kleine lasse sich dies aber schon dadurch erklären, dass es besonders herausfordernd sei, Planetensysteme ähnlich unserem Sonnensystem mit Teleskopen zu beobachten. Vor allem terrestrische Planeten sind deutlich kleiner, masseärmer und leuchtschwächer als ihre großen Brüder und Schwestern, die Gas- und Eisriesen. Und doch eigneten sich die Beobachtungen anderer Planetensysteme laut Joanna Drazkowska hervorragend, um auch etwas über die Entstehung und Entwicklung unseres Planetensystems zu lernen.

Zwar bestimmen viele Details die Forschung von Kleine und Drazkowska, aber es geht ihnen um große Fragen: Wie bildeten sich die vielen bekannten Planetensysteme, hier und überall in der Milchstraße? Wie ist die Erde entstanden, der einzig bekannte Ort im Universum, an dem sich Leben regt? Die Analyse von Meteoritengestein und die Simulation der physikalischen Entstehungsprozesse am Computer lassen uns nicht nur die Geschichte unserer kosmischen Heimat besser verstehen. Sie lassen auch begreifen, warum die Erde so günstige Umstände für Leben entwickelte.

www.mpg.de/podcasts/universum

GLOSSAR

ISOTOPE

sind Varianten ein und desselben chemischen Elements mit leicht verschiedenen Massen. Ursache sind unterschiedliche Zahlen von Neutronen in den Atomkernen, während die Zahl der Protonen und damit die Ladung des Atoms unverändert bleiben.

PROTOPLANETARE SCHEIBEN

sind flache Gas- und Staubströme um junge, neu geborene Sterne, in denen Planeten entstehen.

PEBBLES

sind millimeter- bis zentimetergroße, kieselartige Klümpchen, die in der protoplanetaren Scheibe von außen nach innen wandern. Sie bilden das Baumaterial für die festen Kerne der äußeren Gas- und Eisriesen.

Kontinenteübergreifend:
Mit Tausenden Antennen soll
das Square Kilometre Array
Observatory künftig ein
riesiges Radioteleskop mit
extrem hoher Empfindlich-
keit und Winkelauflösung
simulieren. Die Collage
kombiniert die Planungen
für Parabolschüsseln in
Südafrika (links) und
Antennenfelder im Westen
Australiens.



MADAGASKAR GREIFT NACH DEN STERNEN

TEXT: JEANNETTE GODDAR



BILD: SKAO

Astronomische Observatorien benötigen meist abgelegene Standorte ohne menschliche Störfaktoren. Deswegen stehen viele davon in afrikanischen Ländern. Die Forschung allerdings findet überwiegend im globalen Norden statt. Trotzdem kann schon die Aussicht, Standort eines Observatoriums zu werden, in einem Land wie Madagaskar Bildung und Wissenschaft in Bewegung bringen – so die Erkenntnisse von Hanna Nieber vom Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung.

Es ist ein Projekt der Superlative. Hunderte Parabolspiegel und mehr als 100 000 Antennen werden seit dem vergangenen Jahr in entlegenen Regionen Südafrikas und Australiens installiert, fernab von Städten und menschengemachter Radiostrahlung. Ein Radioteleskop der Superlative sollen sie bilden, beinahe so groß wie der Globus selbst; so vielfältig und empfindlich, dass eine Kartierung unserer Milchstraße ebenso möglich wird wie ein Blick auf die Entwicklungen nach dem Urknall. Getragen wird das Square Kilometre Array Observatory (SKAO) von einer Organisation mit dreizehn Mitgliedern; eines von ihnen ist die Max-Planck-Gesellschaft. Geht alles glatt und das SKAO 2028 in Betrieb, erfüllt sich für die Forschenden in der Radioastronomie ein Traum, der sie schon seit den 1990er-Jahren begleitet. Und einer, an dem sie seit Langem arbeiten.

Das macht eine Geschichte deutlich, der die Ethnologin Hanna Nieber in ihrem Forschungsprojekt „Constellations for Astronomy in Madagascar“ nachspürt. Schon drei Jahre bevor der SKAO-Zuschlag erteilt wurde, machten sich aus Südafrika Astronomen nach Madagaskar auf, das eines von acht Partnerländern werden sollte. Die Mission der Forschenden: ein Treffen mit Minoson Rakotomalala, Professor für Teilchenphysik an der Universität von Antananarivo. Ob er sich vorstellen könne, in der Hauptstadt Madagaskars einen Studiengang für Astronomie einzurichten? Wie hoch die südafrikanischen Besucher die Chancen ihrer Mission einschätzten – in einem Land mit einer Studienanfängerquote von unter fünf Prozent und einem der niedrigsten Bruttoinlandsprodukte der Welt –, kann man nur vermuten. Doch es klappte. „Seit 2014 starten jedes Jahr sechs Physik-Bachelors in ein Masterstudium der Astrophysik“, erzählt Hanna Nieber. Diejenigen, die danach eine wissenschaftliche Laufbahn anstreben, zieht es meistens nach Kapstadt, wo das SKAO intensiv wissenschaftlich begleitet wird.

Die Postdoktorandin am Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung in Halle machte sich 2022 zur Feldforschung nach Madagaskar und Südafrika auf. Hanna Nieber kam über einen Master in Afrikawissenschaften zur Ethnologie; ihr Interesse an diesem Kontinent ist indes teils biografisch bedingt. Ihren Schulabschluss machte sie in Swasiland. Nach einer Promotion zu islamischen Praktiken in Sansibar entdeckte sie die Astronomie für sich. In einem Satz be-

schreibt sie ihr aktuelles Forschungsprojekt so: „Ich wollte herausfinden, was in Antizipation eines solchen Megaprojekts geschieht.“ Zumal in Madagaskar, einem Land, in dem die Rahmendaten selbst im innerafrikanischen Vergleich ernüchternd sind: Zwei von drei Menschen leben unterhalb der Armutsgrenze; schon bevor Zyklon Freddy zu Jahresbeginn mehrfach über die Insel raste, identifizierten die Vereinten Nationen Madagaskar als eins der zehn am stärksten von Naturkatastrophen betroffenen Länder weltweit. In den ländlichen Regionen leben die meisten Familien von dem, was die Erde unter diesen Bedingungen hergibt. Nach Angaben des UN-Kinderhilfswerks Unicef besuchen drei von zehn Kindern nicht einmal die Grundschule, weitere drei schließen diese nicht ab.

Hanna Nieber warnt jedoch davor, aus statistischen Daten falsche Rückschlüsse auf die gesamte Bevölkerung zu ziehen: „Auch in Madagaskar gibt es eine akademisch gebildete Mittelschicht.“ So durchlaufen bei 30 Millionen Einwohnerinnen und Einwohnern immer auch eine größere Anzahl Menschen eine akademische Bildung. Laut einer Übersicht des Hochschul- und Forschungsministeriums Madagaskars gibt es sechs staatliche Universitäten und nahezu 150 private Einrichtungen der höheren Bildung.

Fast alle befinden sich in der Hauptstadt Antananarivo, vor Ort kurz Tana genannt. „Im Grunde leben alle, die über mehr Geld als der Durchschnitt verfügen, in Tana“, berichtet Nieber.

Aus dieser Mittelschicht heraus haben sich in Tana in den ersten Jahren nach Einführung des Studiengangs in Astronomie gleich zwei Vereine gegründet, die sich der Förderung des Faches verschrieben haben. Die Wurzeln des größeren, Malagasy Astronomy and Space

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Seit der Nominierung Madagaskars zum Standort des Teleskop-Großprojekts SKAO wächst im Land das Interesse an Astronomie.

Die Menschen hoffen, dass diese Begeisterung auch in anderen Bereichen die Entwicklung ihres Landes voranbringt.

Durch die Projektzusammenarbeit mit anderen Ländern Afrikas hat sich in Madagaskar erstmals ein Gefühl der Zugehörigkeit zum afrikanischen Kontinent entwickelt.

„Das SKAO bietet eine Zukunft, die man sich in Madagaskar bisher nicht vorstellen konnte.“

HANNA NIEBER



FOTO: ANNA SCHROLL FÜR MPG

Science (Mass), reichen sogar bis in das Jahr 2009 zurück. Hanna Nieber berichtet von mehr als hundert Mitgliedern, die regelmäßig die aktuellen Forschungsergebnisse diskutieren – unter ihnen Studierende der Astronomie, aber auch Bachelorstudentinnen und -studenten aus zahlreichen anderen Fächern. Auch unter den jungen Madagassen, die heute als Promovierende oder Postdocs in Kapstadt forschen, sind sehr viele bei Mass aktiv. Immer wieder kämen sie mit neuen Erkenntnissen im Gepäck zurück in ihre Heimat gereist, hat Hanna Nieber beobachtet. Sie sagt: „Wie eng dieser Austausch ist, das hat mich tatsächlich überrascht.“

Kollegialer Austausch:
Hanna Nieber (Mitte) im
Gespräch mit Lukas
Ley und Julia Vorhölter am
Max-Planck-Institut für
ethnologische Forschung.

Der andere Verein heißt Haikintana, ist wesentlich kleiner und widmet sich so etwas wie aufsuchender Bildungsarbeit. „Seine Mitglieder ziehen in die Dörfer und gehen in Schulen, um Menschen die Astronomie nahezubringen“, erzählt Nieber. Und sind sie nicht unterwegs, lassen sie in einem überaus aktiven Facebook-Kanal keinen Anlass aus, ihre Leidenschaft für Astronomie zu teilen. Partielle Mondfinsternisse werden ebenso angekündigt wie Raumfahrtstarts der Esa oder der Nasa oder internationale Kongresse der astronomischen Jugend. Auch mit kleinen Filmen weckt Haikintana das astronomische Interesse. In einem der Videos sitzt eine junge Frau im Freien unter einer Palme; im Hintergrund werden immer wieder Bilder eingeblendet: von einer „Fiebertmess-Pistole“, wie sie auch in Madagaskar in der Pandemie allerorten im Einsatz waren; von Menschen, die die dabei gemessenen Temperaturen ablesen. In nur rund zwei Minuten erklärt die junge Frau auf diese Weise Grundlagen der Infrarottechnik, die Basis der berührungslosen Temperaturmessung. Der Bezug zur Astronomie? Es war der deutsch-britische Astronom William Herschel, der Anfang des 19. Jahrhunderts die Infrarotstrahlung entdeckte.

33

Das Ziel: mehr Interesse an Naturwissenschaften

Beide Vereine finanzieren sich über ihre Mitglieder, gelegentlich bewerben sie sich erfolgreich um Förderungen, etwa bei der Internationalen Astronomischen Union. Und sind eigentlich viele Frauen dabei?, will man noch von Nieber wissen. Ja, da lasse sich kein Unterschied zu der Beteiligung von Männern feststellen, sagt sie und fügt hinzu: „Mein Eindruck ist: Wer in globalen akademischen Diskursen und Strukturen unterwegs ist, kann die Frage der Geschlechtergerechtigkeit kaum noch außer Acht lassen.“

Das Engagement beider Vereine besteht nicht trotz, sondern gerade wegen der in vieler Hinsicht prekären Lage in ihrer Heimat. „Klimawandel, Korruption, eine instabile politische Landschaft: Meine Gesprächspartner fragen sich natürlich auch: Wie können wir es uns leisten, von der Erde wegzuschauen?“, berichtet die Ethnologin. Die Antwort, die sie sich selbst geben: „Sie gehen von einer inhärenten Begeisterung für den Sternenhimmel aus. Die wollen sie nutzen, um mehr Interesse an den Naturwissenschaften,

—>

und am besten auch am Ingenieurwesen zu wecken. Wenn das gelingt, so die Logik, leistet das einen großen Beitrag zu Madagaskars Entwicklung – und die liegt allen, mit denen ich spreche, sehr am Herzen.“ Dieses Anliegen teilt ausdrücklich auch die Trägerorganisation des SKAO.

Niemand war stolz, zu Afrika zu gehören

Nun kann das nur gelingen, wenn es eine solche „inhärente Begeisterung“ wirklich gibt. Hilft dabei, dass Menschen ihr Schicksal seit Jahrtausenden von Sternbildern und Himmelskörpern geprägt sehen? „Die Astronominen und Astronomen, die ich spreche, weisen eine Verbindung zur Astrologie weit von sich“, sagt Nieber. „In allen anderen Gesprächen kommen mythologische Vorstellungen tatsächlich sofort zur Sprache.“ Die Feldforscherin hört von Dörfern im Hochland, deren Bauweisen von Sternbildern bestimmt sind und sich historisch bis zu den Schlössern des vorkolonialen Königreichs Merina zurückverfolgen lassen: „Typischerweise sind der Ein- und Ausgang nach Westen gerichtet; im Nordosten hingegen wird auch

heute noch mancherorts ein Raum für die Ahnen frei gehalten.“ Derlei Erkenntnisse sind allerdings bisher kein Teil ihrer Forschung, „Es ist gut, diese Geschichten zu kennen, und ich höre sie mit Interesse“, sagt sie. „Doch um dazu zu forschen, fehlt es mir an Sprachkenntnissen. Dazu bräuchte es weitere Forschungs Kooperationen – was natürlich toll wäre.“

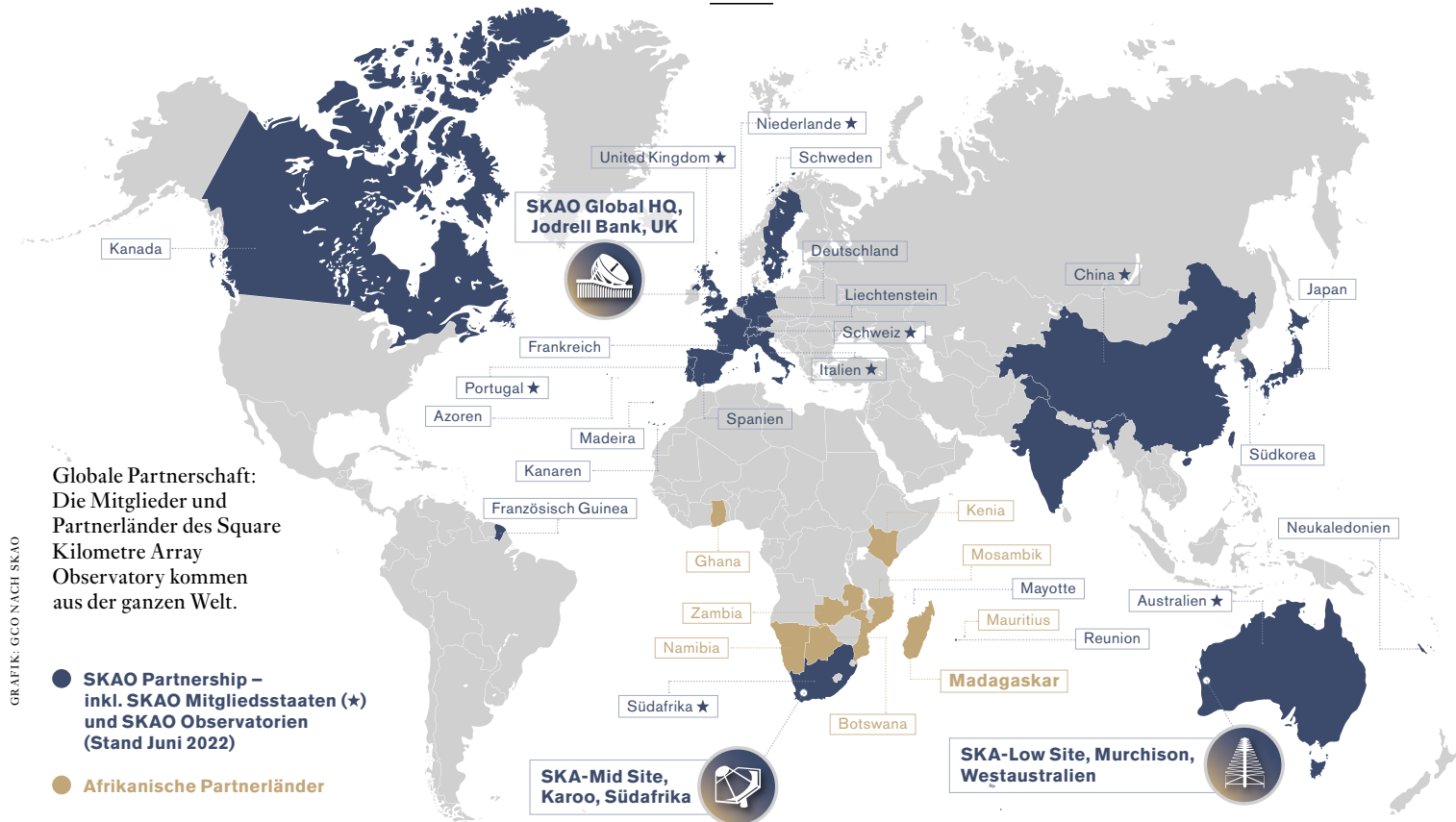
Nieber beherrscht zwar mit Swahili die am weitesten verbreitete Verkehrssprache Ostafrikas. Doch mit dieser oder anderen Bantusprachen ist das Madagassische nicht verwandt. Es ist eher nah dran am Malaiischen, das in Malaysia und Indonesien gesprochen wird. Auch kulturell grenzen sich die Madagassen von Afrika ab, sehen ihre Insel fast als eigenen Kontinent an. Einerseits kann das bei 400 Kilometern bis zur Küste Mosambiks und einer Fläche, die 1,6-mal jener Deutschlands entspricht, nicht überraschen. Andererseits ist Madagaskar ein afrikanischer Staat und Mitglied der Afrikanischen Union. „Aber niemand dort war stolz, Afrikanerin oder Afrikaner zu sein“, hat Hanna Nieber vor Ort erfahren. „Mit dem SKAO ändert sich das. Nun kommt etwas aus Afrika, was hip, toll und cool ist. Und: das eine Zukunft bietet, die man sich in Madagaskar bisher nicht vorstellen konnte“, erzählt sie. Mit dem wissenschaftlichen Austausch nähert sich zudem

34

Ausflug mit Weitblick: Der Verein Haikintana hat sich zum Ziel gesetzt, in Madagaskar das Interesse an Astrologie zu fördern. Hier erklärt ein Vereinsmitglied einer Schulklasse das Sonnensystem.



FOTO: HANNA NIEBER/MPF FÜR ETHNOLOGISCHE FORSCHUNG



ein Diskurs, der in vielen Ländern des globalen Südens bereits an Fahrt aufgenommen hat: Braucht es nach Jahrhunderten der Fremdbestimmung nicht auch ein Entrümpeln der aus weißen Blickwinkeln erforschten Wissensbestände: eine „Dekolonisierung des Wissens“? Innerhalb Afrikas nimmt das bis 1994 von Apartheid geprägte Südafrika hier eine führende Rolle ein. Als Studierende in Kapstadt 2015 gegen eine Statue des britischen Imperialisten Cecil Rhodes auf dem Uni-Campus protestierten, machte das auch in deutschen Medien Schlagzeilen. In der akademischen Welt hätten die „Rhodes Must Fall“-Demonstrationen zu einer Bewegung geführt, die bis heute die Frage stellt, was an Hochschulen gelehrt und wie mit tradierten Wissensbeständen umgegangen werden soll, berichtet


„Für eine universelle Astronomie braucht es die Teilhabe vieler Menschen. An vielen Orten des Planeten.“

HANNA NIEBER

Nieber. Folgt man diesen Ideen nun auch in Madagaskar, das von 1896 bis 1958 französische Kolonie war? „Nein“, erwidert sie, „doch man diskutiert darüber, interessanterweise bisher mit einem anderen Ergebnis als in Südafrika: Die Wissenschaft wird als etwas betrachtet, was jenseits von Dekolonisierung und Partikularisierung Bestand haben sollte.“

So lassen sich, stellt man überrascht fest, aus etwas Fernliegendem wie der Astronomie eine Menge ethnologische Erkenntnisse gewinnen. Hanna Nieber verblüfft das nicht so sehr, sie muss ein bisschen lachen: „Das Zusammendenken von Konzepten aus Geistes- und Sozialwissenschaften und den Naturwissenschaften ist mein schönstes Forschungsziel.“ Aktuell denkt sie vor allem über das in den Disziplinen ganz unterschiedlich betrachtete Konzept von Universalität nach. Während Astronominnen und Astronomen meist davon ausgingen, Wissenschaft sei weder an Person noch Standort gebunden, also universell, sähen Sozialwissenschaftlerinnen und Sozialwissenschaftler das in aller Regel anders: „Für uns ist Wissenschaft kontextgebunden, gekoppelt an Faktoren wie Standort, Kultur, Klasse“, erläutert sie. Mit Blick auf das SKAO, an dem zugleich in Australien und Afrika geschraubt wird, fällt es der Ethnologin leicht, ihre Position zu übertragen: „Wer ein Teleskop hat, sieht nur einen Teil des Himmels. Doch für eine universelle Astronomie braucht es viele Teleskope – und die Teilhabe vieler Menschen. An vielen Orten des Planeten.“

www.mpg.de/podcasts/universum



Ein infernalischer Mahlstrom: In der Illustration umfließt Materie in einer Scheibe ein supermassereiches schwarzes Loch von Millionen bis Milliarden Sonnenmassen und heizt sich dabei auf. In der Umgebung des schwarzen Lochs verdrillen sich Magnetfelder zu einem gebündelten Jet, der Materie nach außen beschleunigt und dabei hell aufleuchtet.

BILD: NASA/JPL-CALTECH

TANZ DER SCHWARZEN LÖCHER

*TEXT:
HELMUT HORNUNG*

Die aktiven Kerne von Galaxien gehören zu den stärksten Kraftwerken im Kosmos. Ihre Energie beziehen sie aus schwarzen Löchern in ihrem Zentrum, die gelegentlich im Doppelpack vorkommen. In einer groß angelegten Kampagne hat eine Gruppe um Stefanie Komossa vom Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie mit mehreren Teleskopen ins Herz einer solchen Energieschleuder geblickt.

Die Eidechse ist ein unscheinbares Sternbild am Nordhimmel, das wohl nur wenige Menschen jemals zu sehen bekommen. In dieser Konstellation spürte Cuno Hoffmeister im Jahr 1929 auf einer Fotoplatte ein schwach glimmendes Lichtpünktchen auf, das ohne erkennbaren Rhythmus flackerte. Der Astronom am Observatorium Sonneberg in Thüringen war genau auf solche Veränderliche spezialisiert – also Sterne, deren Helligkeit mehr oder weniger periodisch schwankt. So wanderte das Objekt unter dem Namen BL Lacertae (lateinisch für Eidechse) in Hoffmeisters Katalog und blieb über Jahrzehnte unbeachtet.

Mysteriöse Fackeln am Firmament

Die weitere Geschichte von BL Lac – so die Kurzform – ist eng mit dem Aufschwung einer neuen Technik verbunden: der Radioastronomie. Nachdem die Forschenden bisher nur im optischen Spektralbereich beobachtet hatten, musterten sie ab den 1940er-Jahren das Weltall mit großen Antennen. Dabei fanden sie im Laufe der Zeit jede Menge kosmische Radioquellen. Einige davon hatten dieselbe Position am Himmel wie bisher unerforschte Lichtpunkte, die in Sternkatalogen verzeichnet waren. So auch das Objekt 3C 273. Auf Fotos, die mit herkömmlichen Teleskopen im sichtbaren Licht gewonnen wurden, erschien es als sternartiger Punkt mit einem länglichen Anhängsel. Was verbarg sich dahinter? Das Erstaunen wuchs, als man das Licht dieses „Radiosterns“ zu einem kleinen Regenbogen zerlegte. In solchen astronomischen Spektren finden sich normalerweise charakteristische Linien, die auf chemische Elemente hindeuten. Auch im Spektrum von 3C 273 waren diese Fingerabdrücke vorhanden, sie ließen sich aber keinem der bekannten Stoffe zuordnen.

Das Rätsel löste der niederländische Astronom Maarten Schmidt im Jahr 1963: Die Linien gehören sehr wohl zu einem chemischen Element, dem Wasserstoff. Allerdings stehen sie nicht an der gewohnten Position, sondern sind in den roten Bereich des Spektrums verschoben, also hin zu längeren Wellenlängen. Das Objekt muss sich folglich von der Erde wegbewegen. Bei 3C 273 ergibt sich eine beachtliche Fluchtgeschwindigkeit von 45 000 Kilometern pro Sekunde – viel zu schnell für einen Stern, der innerhalb unserer Galaxie unterwegs ist. Der beobachtete Effekt lässt sich durch die kosmologische Rotverschiebung erklären. Weil das gesamte Weltall expandiert, bewegen sich die Galaxien wie Rosinen in einem aufgehenden Hefeteig. Das heißt: Es ist der Raum selbst, der sich ausdehnt. Dadurch werden die Wellen einer fernen Quelle „gelängt“ und deren Licht in den roten Bereich verschoben. So errechnete Maarten Schmidt für den mysteriösen Lichtpunkt 3C 273 eine Distanz von nicht weniger als zweieinhalb Milliarden Lichtjahren. Das Objekt kann

folglich kein normaler Stern sein, denn um über eine solch große Entfernung derart hell zu strahlen, muss seine Leuchtkraft jener einer ganzen Galaxie mit ihren Milliarden von Sonnen entsprechen. In weiser Voraussicht hatte man 3C 273 und ähnliche Radiosterne schon vor Schmidts Entdeckung „quasi-stellare Objekte“ genannt und daraus das Kunstwort Quasare abgeleitet.

Im Zuge weiterer Beobachtungen ließen sich immer mehr Radiosterne als solche Quasare identifizieren. So stellte sich im Jahr 1968 heraus, dass der von Cuno Hoffmeister aufgespürte Lichtpunkt BL Lacertae mit der Radioquelle VRO 42.22.01 identisch ist. Auf Fotografien gelang es schließlich, ein schwaches Nebelfleckchen abzubilden, das den „Stern“ umgibt. Davon wurden Spektren aufgenommen, die wiederum Rückschlüsse auf die Natur des Nebels zuließen. Dieser muss ein riesiges Milchstraßensystem sein, in dessen Zentrum BL Lacertae sitzt. Ein solcher aktiver Galaxienkern stößt auf relativ kleinem Raum eine ungeheure Energie aus. Aber BL Lac leuchtet noch heller als die meisten Quasare und zeigt zudem deutlichere Helligkeitsschwankungen. Aus einem Neologismus der Wörter BL Lacertae und Quasare werden solche Galaxienkerne Blazare genannt.

Woher aber stammt der Antrieb für diese kosmischen Kraftwerke? Die Astronominnen und Astronomen sind überzeugt davon, dass in den Zentren der meisten Galaxien gewichtige schwarze Löcher sitzen. „Diese Schwerkraftfallen sind in den Herzen von Quasaren

Kein Stern, sondern eine Galaxie: Das Hubble-Weltraumteleskop bildete den Quasar 3C 273 ab und mit ihm einen Jet, der als schwache Linie links oberhalb des zentralen Lichtflecks zu erkennen ist.

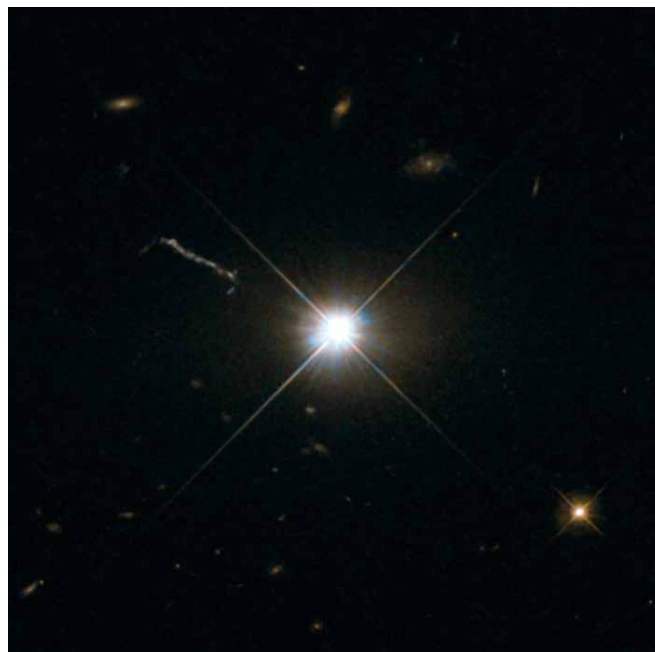


BILD: ESA/HUBBLE

und Blazaren besonders aktiv“, sagt Stefanie Komossa vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn. Durch ihre starke Gravitation sammelt sich jede Menge Materie in ihrer Umgebung. Dieses gasförmige Material strudelt auf Spiralbahnen um das schwarze Loch herum, und seine Teilchen stoßen aneinander. Das Gas erhitzt sich und wandert allmählich in Richtung des schwarzen Lochs. Und je näher es diesem kommt, desto turbulenter wird es. Ein solcher infernalischer Mahlstrom wird als Akkretionsscheibe bezeichnet.

Im Innenbereich der flachen Scheibe wird das Material durch die Reibung so heiß, dass es energiereiche Ultraviolett- und Röntgenstrahlung freisetzt. Das Gas rast in einem wilden Tanz mit hohem Tempo um den kosmischen Schlund und verschwindet schließlich darin. Ein Teil des Gases jedoch dehnt sich aus, wird gebündelt und strömt parallel zur Rotationsachse der Scheibe ins All. Das geschieht in zwei einander entgegengesetzten Jets, die bei manchen Galaxien eine Länge von vielen Tausend Lichtjahren erreichen. Damit messen sie das Millionenfache des schwarzen Lochs samt seiner Akkretionsscheibe.

Der Jet erweist sich unter anderem auch als die Quelle der Radiostrahlung, die solche Quasare aussenden. Denn die zentrale Maschine beschleunigt Partikel entlang verquirlter Magnetfelder, die an einen DNA-Strang erinnern, auf nahezu Lichtgeschwindigkeit. Dabei entsteht unter anderem Synchrotronstrahlung. Weitere Prozesse lassen die Jets im gesamten elektromagnetischen Spektrum aufleuchten und setzen unvorstellbare Energie-

mengen in der Größenordnung von Billionen Elektronenvolt frei – ähnlich wie in irdischen Teilchenbeschleunigern. Jets sind der Schlüssel zur Unterscheidung zwischen Quasaren und Blazaren: Letztere bilden eine Untergruppe der Quasare, bei denen einer dieser starken Scheinwerfer direkt auf die Erde zielt. Blicken wir direkt in den Maschinenraum eines Quasars, sehen wir einen Blazar. Ein solches Objekt ist also im wörtlichen Sinne Ansichtssache, je nachdem, unter welchem Winkel wir es betrachten.

Die turbulenten Jahre des Universums

Diese kosmischen Energieschleudern sind Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt, ihr Licht ist also Milliarden Jahre unterwegs, bevor es in irdische Teleskope fällt. Wir blicken damit in eine turbulente Anfangszeit des Universums zurück, in der die Energiemonster ihre Blüte erlebten. „Damals ist es besonders häufig zu Kollisionen zwischen den Galaxien gekommen“, erklärt Komossa. Der wilde Reigen zweier Galaxien spült dabei große Gasmengen in Richtung des Zentrums und sorgt für Nachschub im Herzen des dabei entstehenden Milchstraßensystems. Ein Quasar oder ein Blazar ist geboren. Damit nicht genug. Die meisten Galaxien besitzen zentrale schwarze Löcher, die beim Crash zweier Milchstraßen zu einem Paar werden können. Der auf diese Weise entstandene galaktische Kern ist ausgesprochen hell und dadurch weithin sichtbar.

39



Blick in einen aktiven Galaxienkern: Die Aufnahme des weltraumgestützten Teleskops Swift zeigt den Blazar OJ 287 im ultravioletten Licht (links). Weitere Beobachtungen legen nahe, dass es sich um ein System zweier schwarzer Löcher handelt, wie in der Illustration (rechts) gezeigt. Zudem entsteht in der Umgebung des zentralen schwarzen Lochs ein Jet.

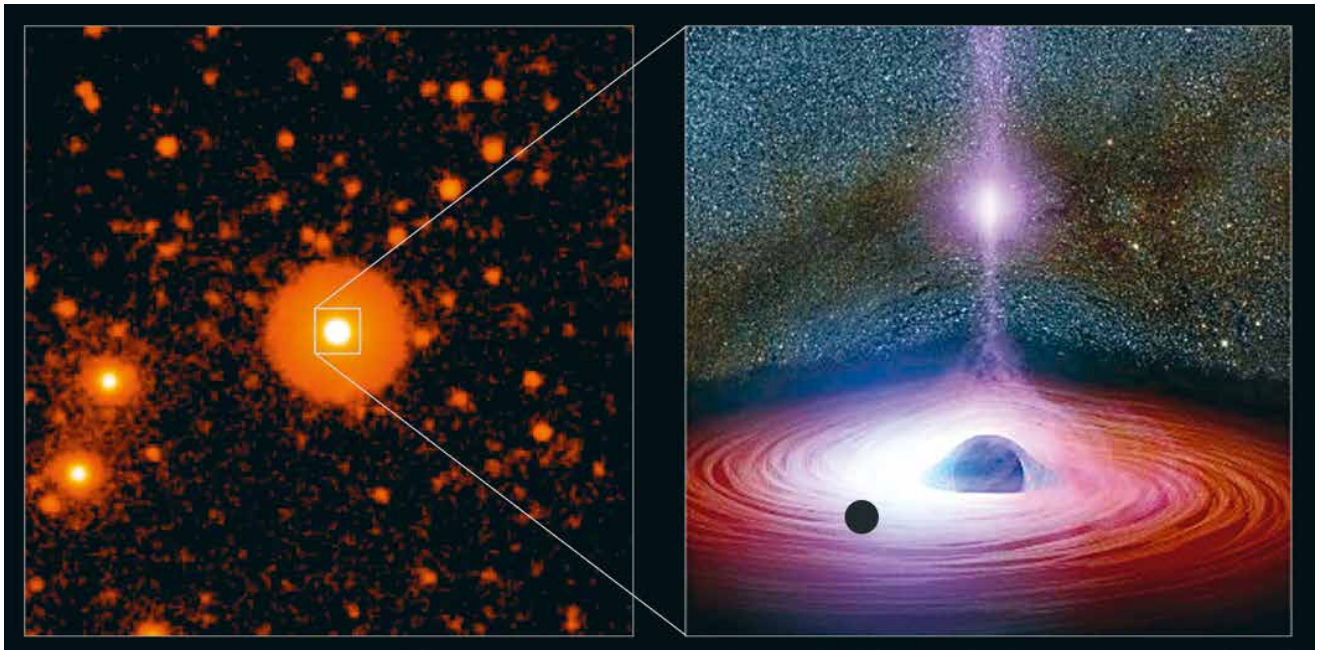
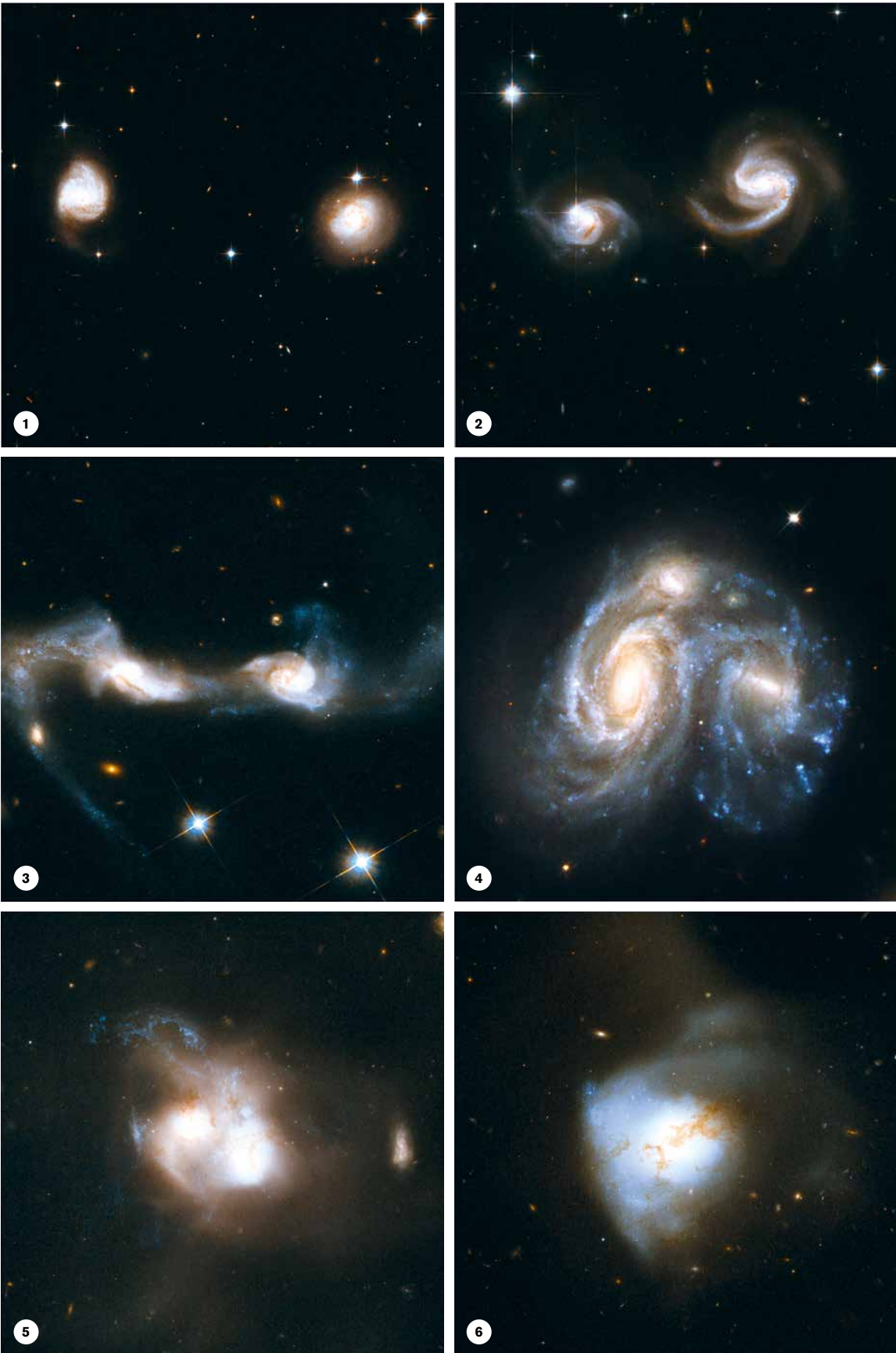


BILD: S. KOMOSSA ET AL. (LINKS); NASA/JPL-CALTECH (RECHTS)

BILD: S. KOMOSSA ET AL.



BILDER: NASA, ESA, THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSC/AURA)-ESA/HUBBLE COLLABORATION AND A. EVANS (UNIVERSITY OF VIRGINIA, CHARLOTTESVILLE/NRAO/STONY BROOK UNIVERSITY), K. NOLL (STSCI), AND J. WESTPHAL (CALTECH)

Kosmische Choreografie: Die Hubble-Aufnahmen zeigen sechs verschiedene Galaxienpaare im sichtbaren Licht. Jede der Aufnahmen steht exemplarisch für ein Stadium zweier miteinander verschmelzender Galaxien, von der ersten Annäherung (Bild 1) bis zur Vereinigung (Bild 6).

Doch wie realistisch ist das geschilderte Szenario? Um dieser Frage in der Praxis auf den Grund zu gehen, beobachten die Forschenden seit ein paar Jahren den rund fünf Milliarden Lichtjahre entfernten Blazar OJ 287 im Sternbild Krebs. Dieses Objekt gilt als heißer Kandidat für die Existenz eines Doppelsystems schwarzer Löcher. So hat ein internationales Team OJ 287 mit der sogenannten Very Long Baseline Interferometry (VLBI) unter die Lupe genommen. Mit dieser Technik wurden die

Signale von zwölf Radioantennen – davon eine an Bord des russischen Satelliten Spektr-R – miteinander kombiniert. Das dadurch entstandene virtuelle Teleskop spannt sich 193 000 Kilometer weit auf und liefert damit ein Auflösungsvermögen von zwölf Mikrobogensekunden; damit könnte man eine 20-Cent-Münze auf dem Mond erkennen.

Ziel der Kampagne war es, die Jets bis zu ihrem Ursprung im Maschinenraum des Blazers zurückzuverfolgen. Die interferometrischen Aufnahmen zeigen einen Strahl mit mehreren hellen Knoten und einer Krümmung, die in Richtung des Ursprungs immer weiter zunimmt. Das stützt die Annahme, dass die Jets durch die beiden zentralen schwarzen Löcher beeinflusst werden. Zudem hat das Team die Schwingungsrichtung der Radiowellen untersucht. Daraus lässt sich auf ein schraubenförmiges Magnetfeld schließen, das die Jets durchzieht – ganz im Einklang mit astrophysikalischen Modellen von der Bündelung der Jets.

Die beobachteten Eigenschaften von OJ 287 deuten tatsächlich auf zwei umeinander kreisende supermassereiche schwarze Löcher hin. Dabei könnte das leichtere auf einer sehr engen elliptischen Umlaufbahn die Akkretions-

scheibe des schwereren etwa alle zwölf Jahre im Abstand von einem Jahr zweimal durchschlagen und so die Materie in der Scheibe gleichsam aufwühlen. Dabei tritt jeweils ein Flare auf. Diese starken Strahlungsausbrüche machen OJ 287 zeitweise zum hellsten Blazar am Himmel.

Wie aber sieht das Binärsystem genau aus? Bis vor Kurzem herrschte die Meinung vor, dass das schwerere (primäre) der beiden schwarzen Löcher eine Masse von ungefähr zehn Milliarden Sonnen besitzt. In der Literatur finden sich sogar Werte von 18 Milliarden Sonnenmassen. Doch dann kam Momo ins Spiel. Momo steht für Multiwavelength Observations and Modelling of OJ 287. Im Rahmen dieses internationalen Projekts wird der Blazar laufend und über viele Jahre hinweg mit mehreren leis-

tungsstarken boden- und weltraumgestützten Teleskopen überwacht. Dabei betrachten die Forschenden das Beobachtungsfenster vom Radio- bis zum Röntgenbereich und gewinnen auf diese Weise Einblicke ins Herz des Blazers. So können sie etwa die Frage klären, welches theoretische Szenario die Verhältnisse darin am besten beschreibt. Die Modelle unterscheiden sich beispielsweise durch die Masse der beteiligten schwarzen Löcher.

Im Rahmen von Momo spielen die 100-Meter-Antenne des Observatoriums Effelsberg sowie die Satellitenmission Swift eine zentrale Rolle. „Wir haben die Masse des primären schwarzen Lochs bestimmt und den Anteil der Materie in der umgebenden Akkretionsscheibe abgeschätzt“, sagt Komossa. Aber: „Das vermeintliche System aus zwei schwarzen Löchern lässt sich räumlich auch mit Momo nicht auflösen.“ So mussten die Astronomen und Astronomen nach indirekten Hinweisen suchen. Und das taten sie mit Erfolg, nahmen sie doch den Helligkeitsverlauf der Lichtkurve mit bisher unerreichter Genauigkeit unter die Lupe. „Dadurch konnten wir zwischen verschiedenen Modellen von Binärsystemen unterscheiden – das führende, wonach das primäre schwarze Loch eine grosse Masse besitzt, haben wir widerlegt“, so Komossa.

Die elektromagnetische Strahlung, die uns von OJ 287 erreicht, wird normalerweise vom Jet dominiert. Dieser stellt das Licht der Akkretionsscheibe förmlich in den Schatten. Das ist ähnlich wie bei einer Taschenlampe: Blicken wir direkt in deren hellen Strahl, blendet uns das Licht, und wir können die unmittelbare Umgebung der Lampe nicht sehen. Weil die Momo-Teleskope die Lichtkurve nahezu kontinuierlich verfolgten, entdeckten sie jedoch „deep fades“ – Zeiten, zu denen das Licht des Jets dunkler wird. In unserem Beispiel entspricht das einem kurzen Flackern der Taschenlampe. Dadurch ließ sich der Anteil der Strahlung aus der Umgebung, also der Akkretionsscheibe, eingrenzen. Das Ergebnis dieser Messungen überraschte: Die Materie um das primäre schwarze Loch leuchtet mindestens um den Faktor zehn schwächer als bisher angenommen, entspricht aber immer noch dem Fünfbillionenfachen der Leuchtkraft unserer Sonne.

Massemonster – leichter als gedacht

Aus der geringeren Helligkeit folgerten die Forschenden schließlich, dass auch die Masse des zugehörigen schwarzen Lochs deutlich geringer ist. „Am ausführlichsten untersucht war bisher jenes Binärmodell, das eine Masse von zehn Milliarden Sonnenmassen benötigt“, sagt Stefanie Komossa. „Dieses Modell können wir mit unseren neuen Beobachtungen ganz sicher ausschließen.“ Denn Momo ergibt eine Masse in der Größenordnung von hundert Millionen Sonnenmassen, also ein Hundertstel des bisher angenommenen Wertes.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Blazare gehören zu den aktiven galaktischen Kernen und sind wahre Energieschleudern. Sie beherbergen in ihren Zentren aktive schwarze Löcher.

Im Herzen des Blazers OJ 287 wurde lange Zeit ein schwarzes Loch mit mindestens zehn Milliarden Sonnenmassen vermutet.

Neue Beobachtungen mit einem Projekt namens Momo zeigen, dass sich in OJ 287 vermutlich ein Paar schwarzer Löcher verbirgt, deren schwereres in der Größenordnung von hundert Millionen Sonnenmassen liegt, also ein Hundertstel der bislang angenommenen Masse hat.

Beobachtungen mit dem Event Horizon Telescope und dem Square Kilometre Array sollen weiteren Aufschluss über das Innenleben von OJ 287 geben.



Untermauert wird dieses Resultat durch eine weitere Messung der Lichtkurve. Nach dem alten Modell hätte im Oktober 2022 bei OJ 287 ein heller Ausbruch beobachtet werden sollen. In diesem Zeitraum wurde aber kein solcher registriert. Vielmehr fanden die Forschenden mit Momo heraus, dass sich die letzten beiden Flares in den Jahren 2016/2017 ereignet hatten. Und: Radiobeobachtungen mit dem 100-Meter-Teleskop in Effelsberg zeigen, dass diese Ausbrüche nicht auf erhitzte Materie zurückgehen. Das bedeutet, dass andere Prozesse in den Jets – etwa Synchrotronstrahlung – als Energiequelle im Spiel sind. Thomas Krichbaum, Komossas Kollege am Bonner Max-Planck-Institut, fasst zusammen: „Alle unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass für das primäre schwarze Loch zehn Milliarden Sonnenmassen nicht erforderlich sind. Ebenso wenig braucht es eine besonders leuchtkräftige Materie-scheibe.“

Neue Erkenntnisse durch Gravitationswellen

Wie aber sieht es nun im Zentrum des Blazars genau aus?

Die Teammitglieder von Momo möchten sich nicht auf ein definitives Modell festlegen, dies sei noch „work in progress“, wie Komossa es formuliert. Auf jeden Fall ist sich die Wissenschaftlerin sicher, dass nur Modelle mit deutlich geringerer Masse des primären schwarzen Lochs infrage kommen. Außerdem wiegt die kleinere Schwerkraftfälle wohl nur ein Hundertstel des primären schwarzen Lochs im Zentrum. Demnach hätte das sekundäre schwarze Loch lediglich eine Million Sonnenmassen. Zudem handelt es sich bei OJ 287 wohl um ein sehr enges Paar schwarzer Löcher, die sich immer näher gekommen sind, seitdem die ursprünglichen Galaxien miteinander kollidiert waren. Die Entfernung der schwarzen Löcher voneinander könnte mittlerweile deutlich unter drei Lichtjahren liegen. Dafür spricht unter anderem das vergleichsweise schnelle Flackern des Blazars.

Die enge Nachbarschaft der beiden Massemonster ist es auch, woraus die Gruppe um Stefanie Komossa ihre Schlüsse für Beobachtungen zieht, die nichts mit dem elektromagnetischen Spektrum zu tun haben und ein recht neuer Zweig der Astrophysik sind: die Messung von Gravitationswellen. Diese entstehen zum Beispiel dann, wenn schwarze Löcher umeinander tanzen und schließlich verschmelzen. Dazu gibt es derzeit zwei Messmethoden: Hightech-Detektoren auf der Erde – oder Pulsare im Universum. Letztere sind rasch rotierende Neutronensterne, die Strahlungskegel in den Weltraum schicken. Wenn diese die Erde überstreichen, scheint der Stern aufzublitzen wie ein Leuchtturm. Die Pulse kommen mit erstaunlicher Genauigkeit auf der Erde an. Wenn jedoch Gravitationswellen die Raumzeit kräuseln, geraten diese hochpräzisen Uhren aus dem Takt. Die Signale verändern sich. Mit

einem solchen „pulsar timing array“ lassen sich die kosmischen Beben einander umtanzender schwarzer Löcher nachweisen. „Jetzt haben wir herausgefunden, dass diese Methode bei OJ 287 nicht funktionieren wird, weil die Masse des primären schwarzen Lochs dafür zu gering ist“, erklärt Stefanie Komossa. „Und das schiebt den Blazar in den Empfindlichkeitsbereich von Detektoren wie Lisa.“ Dieses Laserinterferometer – bestehend aus drei Satelliten, die ein Dreieck mit zweieinhalb Millionen Kilometer Kantenlänge aufspannen – soll in etwa 15 Jahren vom Weltraum aus nach Gravitationswellen fahnden und eine höhere Empfindlichkeit als erdgebundene Detektoren besitzen. Allerdings könnte Lisa nur das finale Verschmelzen der schwarzen Löcher registrieren. Und das passiert im Fall von OJ 287 wohl erst in einigen Hunderttausend Jahren.

Doch schon in absehbarer Zeit könnten die Astronominen und Astronomen neue Erkenntnisse gewinnen. Sie haben ein mächtiges Instrument auf das kosmische Kraftwerk gerichtet: das Event Horizon Telescope, das bisher die spektakulären Bilder der schwarzen Löcher in der fernen Galaxie M 87 und im Zentrum unserer Milchstraße gewonnen hat. Zudem steht der Blazar OJ 287 auf der Liste des Square Kilometre Array – eines Netzwerks aus Hunderten von Radioteleskopen und Hunderttausenden von Antennen, das sich eines Tages über Südafrika und Australien erstrecken soll. „Diese Beobachtungen werden ein großer Schritt sein hin zu einem Verständnis binärer schwarzer Löcher und ihrer Entwicklung“, sagt Komossa. Der Radiostern im Krebs, der 1968 als Blazar erkannt wurde, hat für die Forschung jedenfalls auch nach 55 Jahren nichts an Attraktivität verloren.

www.mpg.de/podcasts/universum

GLOSSAR

GRAVITATIONSWELLEN

entstehen im Weltall immer dann, wenn sich große Massen beschleunigt bewegen – wenn etwa zwei schwarze Löcher umeinander tanzen und schließlich verschmelzen. Gravitationswellen ergeben sich aus der Relativitätstheorie, sie wurden vor mehr als einem Jahrhundert vorausgesagt und im September 2015 erstmals gemessen.

KOSMOLOGISCHE ROTVERSCHIEBUNG

heißt das Phänomen, wonach das Licht einer weit entfernten Quelle aufgrund der Expansion des Universums und damit des gesamten Raums gleichsam gedehnt und in den langwelligen (roten) Bereich des Spektrums verschoben wird.

SYNCHROTRONSTRAHLUNG

wird von geladenen Teilchen wie Elektronen ausgesendet, die in einem Magnetfeld beschleunigt werden. Bei astronomischen Objekten erreichen die Partikel dabei Geschwindigkeiten nahe jener des Lichts.



Die Ausstellung auf dem Frachtschiff

MS 

WISSENSCHAFT

Wissenschaftsjahr 2023 – Unser Universum

Eintritt frei

täglich 10-19 Uhr

Von der Erde bis in ferne Galaxien:
Mit der MS Wissenschaft auf
Entdeckungsreise durchs All

Mai bis September

Alle Tourdaten:



ms-wissenschaft.de | wissenschaftsjahr.de

Eine Initiative des Bundesministeriums
für Bildung und Forschung

Wissenschaftsjahr 2023

unser
UNIVERSUM

Als eine der jüngsten Direktorinnen in der Geschichte der Max-Planck-Gesellschaft leitet Meritxell Huch seit verganginem Jahr ihre eigene wissenschaftliche Abteilung. Ihre Karriere war der Wissenschaftlerin nicht in die Wiege gelegt.

TEXT: NORA LESSING

44

Wenn die aus Barcelona stammende Meritxell Huch eines früh gelernt hat, dann dies: dass sie sich im Leben alles würde selbst erarbeiten müssen. Ihre Eltern hatten keine weiterführende Schule besucht oder gar studiert. Unter der Diktatur Francos kämpften sie vielmehr um ihr ökonomisches Überleben. „Überhaupt arbeiten zu können, war für sie schon ein großes Glück – darüber hinaus hatten sie keinerlei Möglichkeiten.“ In der Schule brillierte das Kind, und schnell wurde klar, dass Meritxell als Erste in der Familie würde studieren können. Aber ihre Eltern konnten die Gebühren für die Universität nicht aufbringen. Dank ihrer herausragenden Schulnoten ergatterte die junge Spanierin jedoch ein staatliches Stipendium. Um sich Bücher und Kleidung leisten zu können, arbeitete sie neben dem Studium noch als Nachhilflehrerin, später in einer Apotheke.

Warum fiel ihre Wahl auf das Fach Pharmazie? „Ich erinnere mich, wie ich in der Schule etwas über die Fotosynthese der Pflanzen und andere Vorgänge in den Zellen lernte und mich fragte: DNA, RNA – wie funktioniert das alles genau?“ Dazu kam noch eine persönliche Leidensgeschichte: „Als Teenager hatte ich häufig starke Kopfschmerzen und nahm Aspirin. Jedes Mal war ich fasziniert: Ich schlucke diese Tablette, und plötzlich ist

der Schmerz weg. Wie kann das sein?“ Neugier, Fleiß und die Unterstützung ihrer Eltern ließen Meritxell Huch entbehrungsreiche Studienjahre durchstehen. Sie lernte unermüdlich, absolvierte zusätzlich zu Studium und Arbeit noch freiwillige Praktika. Zweifel am eingeschlagenen Weg überkamen sie nie. „In meinem fünften Studienjahr war ich von 8 bis 12 Uhr in der Universität, machte von 13 bis 16 Uhr ein Laborpraktikum und arbeitete von 17 bis 22 Uhr in einer Apotheke.“ Für Prüfungen lernte sie in der U-Bahn – Universität und Elternhaus lagen am jeweils anderen Ende der Stadt. „Eine längere Strecke kann man in Barcelona mit der U-Bahn gar nicht zurücklegen. Ich fuhr sie täglich.“ Aber mehr als unter den langen Arbeitstagen litt sie darunter, dass sie ihrer Familie finanziell so wenig helfen konnte, und schon gar nicht wollte sie eine Belastung für ihre Eltern sein.

Es hat nicht viel gefehlt, und sie wäre Apothekerin geworden. „In der Apotheke zu arbeiten, war toll: Die Menschen berichten von ihren Problemen, man hört zu, berät sie. Das schafft große Nähe.“ Aber der Wunsch, mehr zu lernen, war doch stärker. „Im Labor zu sein, mich mit Postdocs und älteren Studierenden auszutauschen, machte mir sehr viel Freude. Mir war klar: Die Arbeit in der Apotheke würde mir das nicht geben können.“ Einer ihrer Professoren wurde schließlich auf die sehr guten Leistungen der Studentin aufmerksam und ermutigte sie, sich für ein Promotionsstipendium zu bewerben.

Für ihre Doktorarbeit forschte Meritxell Huch von 2003 an mit Tumorzellen aus Mäusen. Sie entwickelte ein neuartiges Verfahren zur Therapie von Bauchspeicheldrüsenkrebs und fand heraus, dass die Krebszellen der Maus sich wesentlich von jenen des Menschen unterscheiden. Erkenntnisse zu diesem Krebstyp lassen sich aus diesem Grund

—>

BESUCH BEI

MERITXELL
HUCH



FOTO: SVEN DÖRING FÜR MPG

45

Stammzellen sind die berufliche Leidenschaft von Meritxell Huch. Für die zellulären Alleskönner hat sie so manches Mal die Mittagspause ausfallen lassen.

„Ich habe mich lange unter Druck gesetzt mit dem Gedanken, ich sei nicht gut genug.“

nicht so einfach von der Maus auf den Menschen übertragen. „Dieses Problem hat mich natürlich umgetrieben; schließlich waren die Nager damals ein sehr beliebter Modellorganismus für die Erforschung von Bauchspeicheldrüsenkrebs.“

Auf einer Konferenz machte Huch schließlich eine Begegnung, die ihre wissenschaftliche Laufbahn verändern sollte. Der niederländische Molekularbiologe Hans Clevers bot ihr einen Arbeitsplatz in seinem Labor an. Der Wissenschaftler ist Experte für Stammzellen und hatte zu jenem Zeitpunkt gerade Stammzellen im Darm entdeckt. Kurz bevor Huch nach Utrecht wechselte, war es Clevers und seinem Postdoc Toshiro Sato gelungen, zum ersten Mal natürliches Darmgewebe aus Stammzellen der Maus wachsen zu lassen. Die Forschenden hatten zu diesem Zweck in der Petrischale exakt die Bedingungen nachgeahmt, die in einem lebenden Organismus herrschen. Die Zellen vermehren sich und bilden in der Petrischale eine Struktur, die mit einem natürlich entstandenen Gewebe vergleichbar ist. Auf diese Weise entstehen bis zu wenige Millimeter große Zellklumpen, die sämtliche Zelltypen des Darmgewebes enthalten, die eigenständig wachsen und sich genetisch nicht verändern.

Bevor Clevers die Züchtung von Darmorganoiden gelungen war, hatten Forschende Darmzellen lediglich wenige Tage lang in der Petrischale am Leben erhalten können. In dieser Zeit verloren die Zellen nach und nach ihre Form und ihre Funktion, mutierten unter Umständen sogar und starben schließlich. Mit der neuen Technik dagegen schien es möglich, menschliches Körpergewebe im Labor zu vermehren und es anschließend an Patientinnen und Patienten zu übertragen. Organoide sind also weit mehr als einfach nur ein multizelluläres Gebilde – nämlich der Durchbruch hin zur Zelltherapie der Zukunft.

Ursprünglich wollte Meritxell Huch in Clevers' Labor herausfinden, ob auch in Darmtumoren Stammzellen vorkommen. Die Erfahrungen, die sie in ihrer Doktorarbeit mit Tumorzellen gemacht hatte, wären ihr dafür zupassgekommen. Nun brannte ihr allerdings noch eine andere Frage unter den Nägeln: Lassen sich Organoide ausschließlich mit Darmgewebe züchten, weil dieses vermehrungsfähige Stammzellen enthält? Oder kann dies auch mit anderen Gewebetypen funktionieren?

→

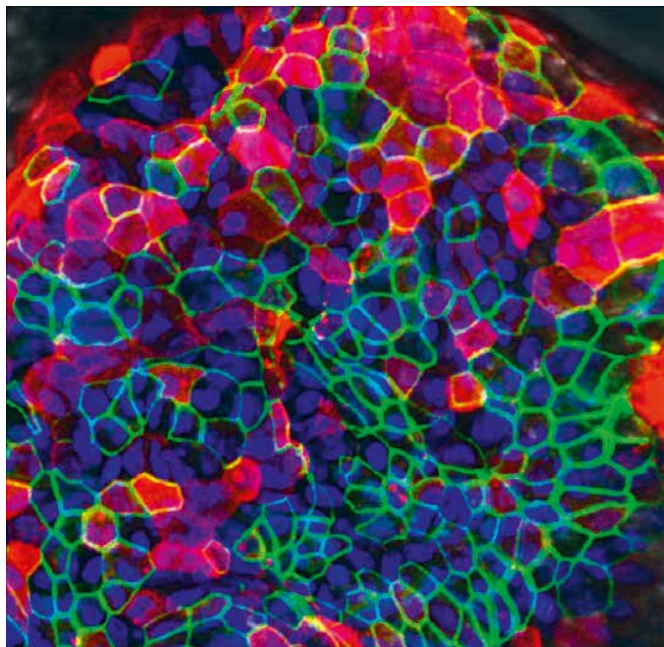


FOTOS: SVEN DÖRING FÜR MPG



47

Meritzell Huch stammt aus Barcelona. Nach Forschungsaufenthalten in den Niederlanden und in Großbritannien kam sie 2020 nach Dresden. Hier leitet sie eine Abteilung am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik.



Mikroskopaufnahme eines Organoids aus menschlichen Leberzellen. In dem etwa stecknadelkopfgroßen Zellhaufen laufen viele Vorgänge ab wie in einer echten Leber. An ihm lässt sich daher die Funktionsweise des natürlichen Organs gut untersuchen.



In ihrer Forschung beschäftigt sich Meritxell Huch mit der Regeneration von Gewebe. Zusammen mit ihrem Team hat sie beispielsweise herausgefunden, dass direkte Kontakte zwischen einem bisher nicht berücksichtigten Leberzelltyp und dem benachbarten Epithel die Regenerationsfähigkeit der Leber steuern.

Besonders vielversprechend erschien es ihr, Organoide aus Magengewebe zu züchten, denn dieses ähnelt dem Gewebe des Darms sehr stark. Aber der Erfolg wollte sich lange Zeit nicht einstellen. „Schließlich setzte ich mir eine Frist: Würde es mir bis dahin nicht gelingen, die Magen­zellen in der Petrischale zum Wachsen zu bringen, würde ich das Projekt aufgeben. Aber siehe da: Zwei Wochen vor Verstreichen der Frist erblickte das erste Magenorganoid das Licht der Welt“, erzählt Huch. Organoide aus Leber- und später auch aus Bauchspeicheldrüsen­gewebe kamen als Nächstes.

2014 wechselte Huch von Utrecht nach Cambridge und baute dort eine eigene Forschungsgruppe auf. Ihrem Team gelang es, auch aus menschlichem Gewebe Organoide zu züchten. Mit dieser Technik kultivierten die Forschenden Leberkrebszellen und Zellen von Menschen mit erblichen Lebererkrankungen.

„Hier zeigt sich das riesige Potenzial von Organoiden: Mit ihrer Hilfe lässt sich die Wirkung von Medikamenten auf menschliches Gewebe testen. So machen sie viele Tierversuche überflüssig, die man sonst zur Entwicklung neuer Medikamente durchführen müsste“, erklärt die Wissenschaftlerin. Organoide sind zudem zuverlässige Untersuchungsobjekte, da ihre Zellen höchst selten mutieren. Das Risiko, dass aus ihnen Tumore entstehen, ist gering. Warum sie genetisch so stabil sind, ist noch unklar. Nun muss die Technik für die Erforschung von Wirkstoffen in der Medizin weiterentwickelt werden. Bis Patientinnen und Patienten davon profitieren werden, ist es noch ein langer Weg. Der Grundlagenforschung erlauben Organoide dagegen schon heute Einblicke in den Maschinenraum des Lebens.

Vor vier Jahren erhielt Meritxell Huch eine Gruppenleiterstelle im Lise-Meitner-Exzellenzprogramm der Max-Planck-Gesellschaft und verlegte ihr Labor an das Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik. Zuerst pendelte sie zwischen

der Familie in Cambridge und ihrem neuen Job in Deutschland. Nun sind alle Umzüge abgeschlossen und die neuen Laborräume in Betrieb genommen. Seit einem Jahr ist sie Direktorin und damit wissenschaftliches Mitglied der Max-Planck-Gesellschaft.

Von der mittellosen Pharmaziestudentin zur Spitzenwissenschaftlerin – eine Erfolgsgeschichte, ganz ohne Frage. Trotzdem war Huchs Weg nicht frei von Selbstzweifeln. „Ich habe mich lange Zeit unter Druck gesetzt mit dem Gedanken, ich sei nicht gut genug.“ Sie reagierte darauf mit unerbittlichem Fleiß und biss sich durch. Jahrelang ließ sie Mittagspausen ausfallen und verbrachte Nächte und Wochenenden im Labor. Ihr Lebenspartner kümmerte sich um die beiden gemeinsamen Kinder und hielt ihr den Rücken frei. „Der Druck schwindet aber nicht, er verschiebt sich: Zunächst war es die Sorge, nicht zu genügen, dann die Angst, meine Ex-

„Ich bin sehr dankbar für mein Leben – mehr könnte ich mir nicht wünschen.“

49

perimente könnten scheitern. Heute ist es die Aufgabe, mein Team zu managen oder mein Privatleben mit meinem Beruf zu vereinbaren. Harte Arbeit hat mir nie etwas ausgemacht – vielleicht, weil ich es zu Hause so gelernt habe. Aber Familie und Labor unter einen Hut zu bekommen, das muss ich noch besser lernen.“

Optimal wäre wohl dennoch ein Tag mit 28 Stunden. „Dann könnte ich vielleicht auch etwas Zeit für mich finden, klassische Musik hören, Theaterstücke besuchen und englische Klassiker aus dem 19. Jahrhundert lesen.“ Wie es aussieht, werden diese Aktivitäten also fürs Erste noch warten müssen. Trotzdem ist Meritxell Huch mit sich im Reinen: „Niemand in meiner Familie hätte jemals gedacht, dass ich überhaupt einen Universitätsabschluss mache. Heute sind alle sehr stolz auf mich, und meine Mutter sammelt jedes Foto, auf dem ich einen Preis übergeben bekomme, und jeden Artikel, den ich eingereicht habe. Ich bin sehr dankbar für mein Leben – mehr könnte ich mir nicht wünschen.“

←



FOTO: MPI FÜR PLASMAPHYSIK / JAN HOSAN

ZWEITER BLICK

*MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR PLASMAPHYSIK*

Gefangen im Magnetkäfig: Um künftig durch Kernfusion Energie gewinnen zu können, bändigen Forschende mehr als 100 Millionen Grad Celsius heiße Plasmen mit Magnetfeldern, sodass die Gemische aus geladenen Teilchen berührungsfrei in ringförmigen Vakuumgefäßen schweben. Das Foto links erlaubt den Blick in ein solches Gefäß – das Experiment Asdex Upgrade in Garching bei München. Das rechte Bild zeigt die Computersimulation eines Plasmas im Querschnitt, und zwar so, wie es in Asdex Upgrade schweben würde. Die roten Bereiche stellen Instabilitäten am Rand dar. Solche Eruptionen – sogenannte Edge Localized Modes (ELMs) – können das Vakuumgefäß beschädigen. Durch Erkenntnisse aus Simulationen und Experimenten gelingt es jedoch immer besser, die ELMs zu unterdrücken.

51

75 JAHRE

52



BILD: SCIENCE PHOTO LIBRARY / NASA

Verzögerte Erholung: Das menschengemachte Ozonloch über der Antarktis erreichte am 9. September 2000 und am 24. September 2006 (Bild) mit 29,5 Millionen Quadratkilometern ein Maximum. Seither schrumpft das Ozonloch langsam wieder.

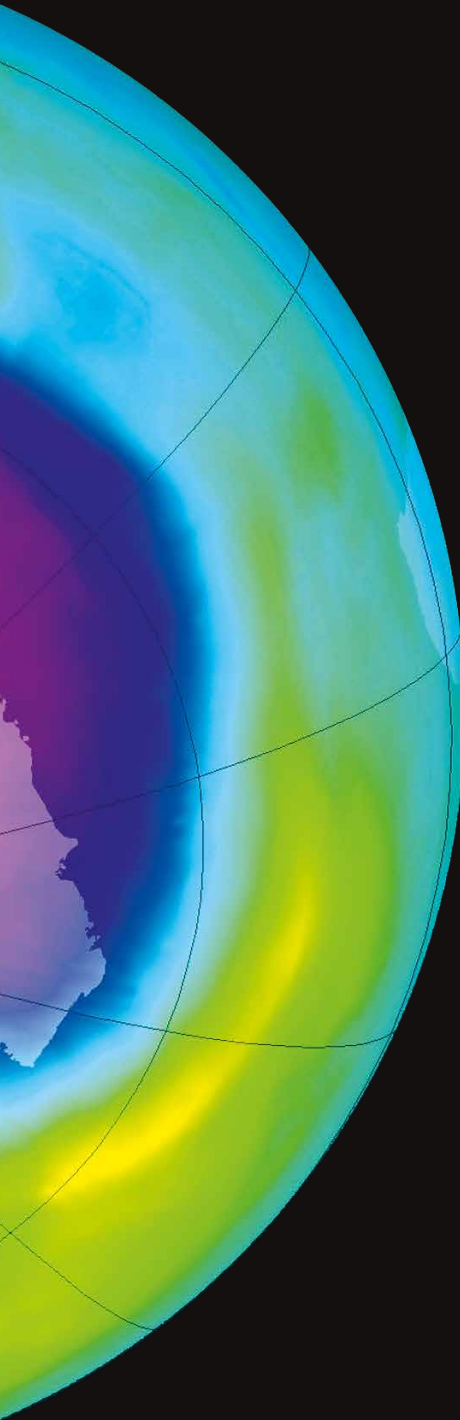
DIE ERDE IM VITALTEST

TEXT: ROLAND WENGENMAYR

Klimakrise, Artensterben, Ozonabbau – ökologische Fehlentwicklungen bedrohen das Leben auf der Erde, wie wir es kennen, und damit auch die gesellschaftliche Stabilität. Der Gefahr lässt sich, wie im Fall des Ozonlochs, nur begegnen, wenn die Zusammenhänge durch und durch verstanden sind. Das ist das Ziel des Erdsystemclusters in der Max-Planck-Gesellschaft.

An seiner Entstehung haben die beiden späteren Nobelpreisträger Paul J. Crutzen und Klaus Hasselmann maßgeblich mitgewirkt.

53



Beim Blick aus dem Weltall wird unmittelbar klar, welche Spezies die Erde heute beherrscht. Auf der Nachtseite zeichnet ein Netzwerk von Lichtern die Aktivität des Menschen nach, auf der Tagseite ist diese an vielen künstlichen Strukturen erkennbar. Auch im Boden hinterlässt der Mensch längst Spuren. Das brachte bereits 1873 den italienischen Geologen Antonio Stoppani dazu, in einem Lehrbuch das „Anthropozoikum“ auszurufen. Dass dieser Begriff heute, leicht variiert, als „Anthropozän“ im allgemeinen Wortschatz angekommen ist, geht allerdings auf Paul J. Crutzen zurück. Im Jahr 2000, auf einer Konferenz des International Geosphere-Biosphere Programme in der mexikanischen Stadt Cuernavaca, rief der Max-Planck-Forscher und Chemie-Nobelpreisträger, während des Vortrags eines Kollegen sinngemäß aus: Stopp, hören Sie auf, vom Holozän zu reden – wir leben im Anthropozän!

Das Holozän ist die gegenwärtige geologische Epoche der Erdgeschichte: Doch in diesem Begriff ist der massive Einfluss des Menschen auf die Erde noch nicht berücksichtigt.

Die Anekdote erzählt Jürgen Renn, Direktor am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin. Gerade ist er mit dem Aufbau des Max-Planck-Instituts für Geoanthropologie beschäftigt, das seit 2022 in Jena am Standort des früheren Max-Planck-Instituts für Menschheitsgeschichte entsteht. Es ist das jüngste innerhalb eines Clusters von Max-Planck-Instituten, die verschiedene Facetten des Erdsystems erforschen. Das Erdsystem umfasst die Gesamtheit aller miteinander im Austausch stehenden Sphären der Erde: die Atmosphäre, also die Lufthülle; die Hydrosphäre, die Wasserhülle, vor allem die Ozeane; die Lithosphäre, die Welt unter unseren Füßen und tiefere



FOTO: DLR



54

Überflieger: Mit dem für extreme Höhen geeigneten Forschungsflugzeug Halo analysieren unter anderem Forschende des Max-Planck-Instituts für Chemie Spurengase in der Atmosphäre und die Verbreitung von Schadstoffen.

Stopp, hören Sie auf, vom Holozän zu reden – wir leben im Anthropozän!

PAUL J. CRUTZEN

Gesteinsschichten; die Kryosphäre in den vereisten Regionen; die Biosphäre. Und das ist noch nicht alles. Renn rechnet auch die vom Menschen geschaffene Infrastruktur dazu, denn diese sei inzwischen allein schon gewichts- und energiemäßig mit der Biosphäre vergleichbar. „Die Technosphäre ragt in der Tat aus der Biosphäre heraus“, sagt er, „und wenn

wir die Erdsystemperspektive einnehmen, liegt es nahe, diese Sphäre vergleichbar zu den anderen Erdsphären zu behandeln – natürlich nicht nur isoliert, sondern in ihrer Wechselwirkung mit den anderen Erdsphären.“

Als erstes Forschungsziel soll das neue Institut in Jena „die dynamische Entwicklung dieses gekoppelten Mensch-

Erde-Systems“ untersuchen, so Renn. Geschehen soll dies in einer interdisziplinären Zusammenarbeit von Forschenden aus den Sozialwissenschaften, der Wissenschaftshistorie, der Klimaforschung bis hin zur Archäologie. Damit verknüpft soll das Institut sich auch mit der Frage nach der „Großen Beschleunigung“ auseinandersetzen. Dieser Begriff basiert auf der Beobachtung, dass alle bedeutenden Eingriffe des Menschen in das Erdsystem der letzten zwei Jahrhunderte im Vergleich etwa zu geologischen Prozessen nicht nur sehr schnell ablaufen – sie scheinen überdies eine exponentielle Beschleunigung zu erfahren. Ob das so ist und, falls ja, wel-

che Einflüsse im Mensch-Erde-System wesentlich sind, das wollen die Jenaer untersuchen.

Das Max-Planck-Institut für Geoanthropologie wird sich also mit Fragen etwa im Zusammenhang mit der Klimakrise beschäftigen, die nicht mehr nur die verschiedenen Disziplinen der Naturwissenschaften betreffen, sondern mittlerweile auch im Fokus der geistes-, sozial- und humanwissenschaftlichen Forschung sind. Die Geoanthropologie mit ihrer neuen Dimension von Interdisziplinarität ergänzt nun in der Max-Planck-Gesellschaft die Erdsystemforschung, deren Anfänge in die 1960er-Jahre zurückreichen – auch wenn der Begriff Erdsystemforschung damals noch keine Rolle spielte.

„Der Begriff entstand in den Achtzigerjahren, im Vorfeld zum International Geosphere-Biosphere Programme“, erläutert der Wissenschaftshistoriker Gregor Lax, der am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte

die Entstehung des Erdsystemclusters erforscht. Das International Geosphere-Biosphere Programme untersuchte in den Jahren 1986 bis 2015 verschiedene Aspekte des globalen Wandels, der auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist. Als das Programm initiiert wurde, war die Erdsystemforschung in der Max-Planck-Gesellschaft bereits bedeutend genug, um daran zu teilzunehmen.

Wichtig für die Vorgeschichte des Fachgebiets ist die Gaia-Hypothese, nach der das Leben zusammen mit der anorganischen Welt ein komplexes System bildet, das sich selbst reguliert. Entwickelt hat die Hypothese in den frühen 1970er-Jahren der britische Forscher James Lovelock – gemeinsam mit der US-amerikanischen Evolutionsbiologin Lynn Margulis. Beide machten die Gaia-Hypothese auch über Bücher bekannt. „Und die Erdsystemwissenschaft ist 1983 als Begriff durch ein Nasa-Komitee hinzugekommen“, erklärt Lax.

Ein Ursprung des Forschungsgebiets liegt in den frühen 1960er-Jahren im Meteorologischen Institut der Universität Stockholm, das Crutzens Doktorvater Bert Bolin leitete, der andere Ursprung in den USA. Führend waren dort zwei Meeresforschungsinstitute: die Scripps Institution of Oceanography in La Jolla, Kalifornien, sowie die Woods Hole Oceanographic Institution in Woods Hole, Massachusetts. Während Bolin als Meteorologe vor allem die Atmosphäre im Blick hatte, dominierte in den USA die Ozeanographie. In La Jolla forschte Klaus Hasselmann als junger Assistenzprofessor in den frühen 1960er-Jahren. 2021 erhielt er als zweiter Max-Planck-Wissenschaftler den Nobelpreis auf dem Gebiet der Erdsystemforschung.

In den 1960er-Jahren sei die Max-Planck-Gesellschaft im neu aufkommenden Forschungsfeld allerdings noch so gut wie nicht vertreten gewesen, berichtet Lax. Das änderte sich erst, als es sich als sehr schwierig er-

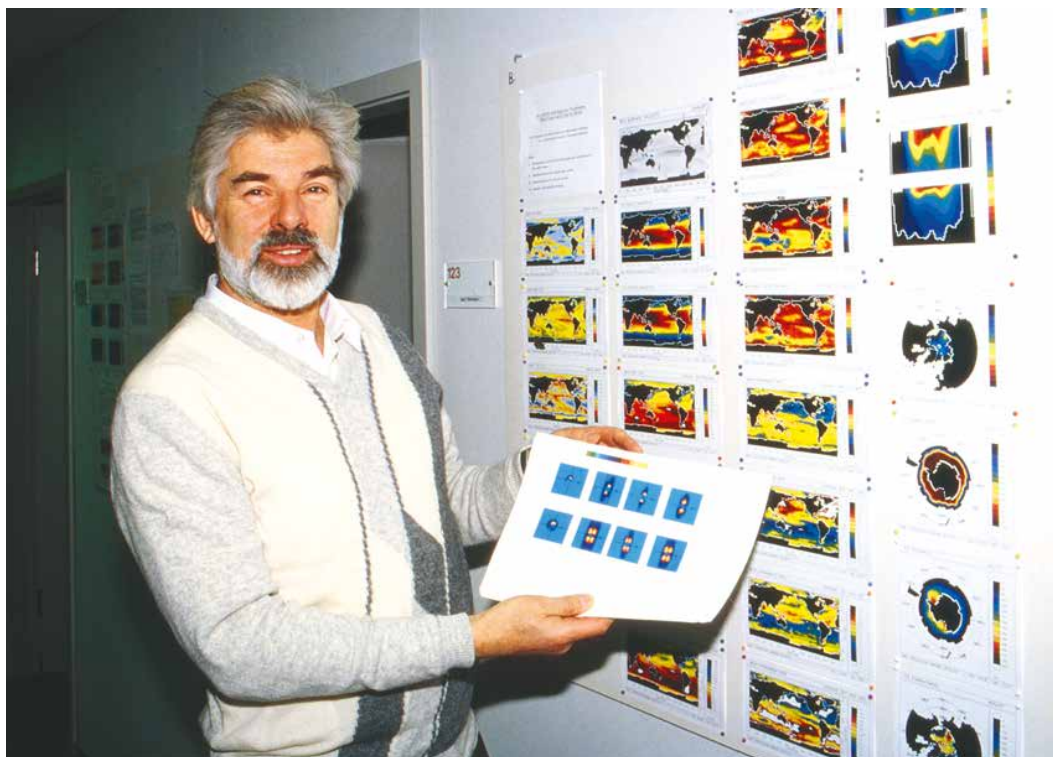
→

55

Lebensaufgabe Umweltforschung: Paul J. Crutzen trug entscheidend zum Verständnis des Ozonabbaus bei. Er trieb die Erdsystemforschung in der Max-Planck-Gesellschaft voran, ebenso die Verbreitung des Begriffs Anthropozän. 2021 ist der Nobelpreisträger gestorben.



FOTO: ARCHIV DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



Detektiv der Erderwärmung: Klaus Hasselmann entwickelte die statistischen Methoden, mit denen seine Gruppe in den 1990er-Jahren erstmals den menschlichen Fingerabdruck im Klima nachwies.

56

wies, für das Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz eine neue Leitung zu berufen, die das Institut auf dem bisherigen Forschungsgebiet hätte weiterführen können. Das ging so weit, dass im Max-Planck-Präsidium sogar die Schließung des Instituts diskutiert wurde; dafür war jedoch die Zahl der Mitarbeitenden zu groß. Zudem besaß die Abteilung für Kosmochemie weltweites Renommee; sie bekam beispielsweise Ende der 1960er-Jahre von der Nasa Mondgestein aus der Apollo-11-Mission zur Analyse – eine der größten Proben, die eine Institution außerhalb der USA erhielt. Nach gescheiterten Berufungsversuchen beschloss die Max-Planck-Gesellschaft, die Forschung des Instituts neu auszurichten, und wandte sich über Umwege an den Meteorologen Christian Junge von der Universität Mainz, den sie schließlich auch berief. In den 1950er-Jahren

zum Beispiel hatte Junge in den USA bei Ballonexperimenten in der Stratosphäre eine Aerosolschicht aus Schwefelsäurepartikeln entdeckt – die nach ihm benannte Junge-Schicht.

Als Direktor steuerte Junge ab 1968 die Forschung des Instituts radikal um und baute eine Abteilung für Atmosphärenchemie auf. Da in den 1970er-Jahren das Umweltbewusstsein allgemein wuchs, bekam die Erforschung der chemischen Spurenstoffe und ihrer Kreisläufe auf der Erde zunehmend Aufmerksamkeit. Und die neue Mainzer Forschung gewann auch international an Reputation. So gelang es Junge 1980 schließlich, einen aufstrebenden Kopf der Atmosphärenchemie als seinen Nachfolger nach Mainz zu holen: Paul Crutzen, der zuvor am National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado, geforscht hatte.

Crutzen brachte die Computermodellierung chemischer Vorgänge in der Atmosphäre an das Max-Planck-Institut für Chemie. Dabei war der Niederländer ursprünglich Brückenbauingenieur. Nachdem er zunächst als solcher gearbeitet hatte, bewarb er sich beim Meteorologischen Institut in Stockholm, das einen Programmierer suchte. Nach eigenem Bekunden hatte Crutzen damals keine Ahnung vom Programmieren. Doch der blitzgescheite junge Mann erhielt die Stelle, kam so in Kontakt mit der Atmosphärenchemie und studierte dann noch Meteorologie. Bereits ab Mitte der 1960er-Jahre erforschte er ein Phänomen, das auch politisch sehr relevant werden sollte: die katalytische Zerstörung des Ozons in der Atmosphäre durch Stickoxide, aber auch durch chlorhaltige Substanzen wie die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW). Diese Arbeiten wurden

1995 besonders erwähnt, als Crutzen sowie der in Mexiko geborene Mario Molina und der US-Amerikaner Sherwood Rowland, zwei weitere Pioniere der Ozonloch-Forschung, den Nobelpreis für Chemie erhielten.

Molina und Rowland zeigten 1974, dass die Halogenkohlenwasserstoffe in Spraydosen, Kühlschränken und vielen industriellen Prozessen die Ozonschicht und damit den Schutz vor schädlicher Ultraviolettstrahlung aus dem All zerstören können. Etwa zur gleichen Zeit erforschte Paul Crutzen – teils gemeinsam mit Frank Arnold vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg – den Ozonabbau in der Atmosphäre. Zumindest in den USA machte die Umweltbewegung die existenzielle Gefahr eines Ozonlochs nun weithin bekannt und stärkte den beiden in den USA forschenden Chemikern Molina und Rowland den Rücken gegen die mächtige Industrielobby.

In der Bundesrepublik Deutschland wurde die Bundesregierung in den späten Siebzigerjahren aktiv, etwa mit dem „Blauen Engel“ für FCKW-freie Spraydosen. 1985 wurde dann das Ozonloch über der Antarktis entdeckt, was auch die politische Einigung auf ein internationales Verbot von Halogenwasserstoffen beschleunigte. So wurde im September 1987 das internationale Montrealer Protokoll zum Schutz gegen Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen, verabschiedet. Die Bundesrepublik Deutschland gehörte zu den ersten der mittlerweile 198 Vertragsstaaten, und schon im Oktober 1987 gründete der Bundestag die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“. In ihr sollten Abgeordnete und Forschende Vorschläge zur Umsetzung des Montrealer Protokolls unterbreiten.

Über eine Sonderregelung konnte Paul Crutzen, obwohl Niederländer, teilnehmen, wie Hartmut Graßl erzählt. Der Klimaforscher war damals Direktor des Instituts für Physik am GKSS-Forschungszentrum bei Hamburg und wechselte 1988 als Direktor an das Max-Planck-Institut für Meteorologie. Auch Graßl kam später in die Kommission und erfuhr dort, wie die deutsche Industrielobby heftigen Widerstand gegen das Verbot von FCKW leistete. Er erlebte, wie der Vorsitzende der Enquete-Kommission, der CDU-Politiker Bernd Schmidbauer, den Industrievertreter „so richtig anblaffte“: „Wann endlich geben Sie diese Hinhaltenaktik auf! Diese Substanzen müssen gestoppt werden!“ Damit sei ganz klar gewesen, so Graßl, dass auch die bisherige Unterstützerpartei der Industrie, die CDU, jetzt den Ausstieg wollte. Am Ende beschloss die Enquete-Kommission ein Dokument, das „fast wortgleich ins Englische übersetzt, in die Verschärfung des Montrealer Protokolls von 1990 übernommen wurde“, berichtet Hartmut Graßl.

Gesellschaftlich ebenso relevant wie Paul Crutzens Erkenntnisse zum Ozonabbau in der Atmosphäre war und ist Klaus Hasselmanns Forschung zum menschengemachten Klimawandel. Und so wie Crutzen nicht den direkten Weg in die Atmosphärenforschung nahm, führte auch Hasselmanns Karriere erst über einen Umweg in die Klimaforschung und an das Max-Planck-Institut für Meteorologie: Als junger Wissenschaftler wurde er in der Wellenforschung bekannt, weil er einen Weg fand, das Spektrum der verschiedenen Wellenlängen in einer Meereshöhe genau zu berechnen – ein für die Schifffahrt in hohem Maße relevantes Problem.

→

Der höchste Forschungsturm der Welt: Mit dem 325 Meter aufragenden Amazon Tall Tower Observatory, kurz Atto, untersuchen Forschende etwa den CO₂-Austausch zwischen Amazonasregenwald und Atmosphäre.





58

Vom Forschungsschiff Maria S. Merian starteten Max-Planck-Forschende 2020 in der Karibik Cloudkites – Ballone, mit denen sie die Mikroprozesse in tropischen Wolken untersuchen. Das Projekt Eurec⁴a soll den Einfluss der Erderwärmung auf die Wolken- und Niederschlagsbildung in den Tropen klären – eine wichtige, bislang aber nicht komplett verstandene Rückkopplung im Klimawandel.

Hasselmanns herausragende Fähigkeiten als theoretischer Physiker waren der Grund, warum die Max-Planck-Gesellschaft auf ihn aufmerksam wurde und ihn zum Gründungsdirektor eines Instituts berief, dessen Forschungsschwerpunkt für ihn neu war. Als designerter Direktor war er sogar schon an der Planung für das Institut beteiligt, dessen Entste-

hungsgeschichte in zweifacher Hinsicht außergewöhnlich ist. Zum einen ging es aus dem Fraunhofer-Institut für Radiometeorologie und maritime Meteorologie hervor. Zum anderen kam der Impuls dafür vom Bundesforschungsministerium, das im Jahre 1973 bei der Max-Planck-Gesellschaft anfragte, ob sie das Fraunhofer-Institut übernehmen könne: Das Institut

war zwar international sehr angesehen, es passte allerdings nicht gut zur Fraunhofer-Gesellschaft mit ihrem Schwerpunkt auf angewandter Forschung.

Über seinen Start am Max-Planck-Institut für Meteorologie sagte Hasselmann seinem langjährigen Mitarbeiter Hans von Storch, der über mehrere Jahre Interviews mit Hasselmann führte und diese 2021 in einem Buch über den frisch gekürnten Nobelpreisträger veröffentlichte: „Alle erwarteten von uns, dass wir einen riesigen Computer kaufen und anfangen zu rechnen. Und mir war klar, dass wir viele der grundlegenden Fragen zum Klimawandel und zum Einfluss des Menschen auf das Klima noch nicht verstanden hatten. Mir ging es vor allem darum, die Grundlagen des menschlichen Einflusses auf das Klima zu klären. Wie können wir zwischen natürlichen und vom Menschen verursachten Klimaschwankungen unterscheiden?“

Diese Fragen führten zu einem schwierigen Problem: Wie ließen sich im gigantischen Rauschen der Witterschwankungen langfristige Klimatrends nachweisen? Und wie war das noch vergleichsweise winzige und langfristig doch gewichtige Signal aufzuspüren, das der Mensch durch die Freisetzung von Treibhausgasen als Fingerabdruck im Klimasystem hinterlässt? Tatsächlich beantwortete Hasselmann diese Fragen mit zwei Forschungsarbeiten. Mitte der 1990er-Jahre wies sein Team in Hamburg auf dieser Basis bereits mit hoher Sicherheit nach, dass der Mensch das Klima verändert. Die Simulation von Klimamodellen auf Supercomputern war da längst unverzichtbar geworden: Unter Hasselmanns Ägide wurde in Hamburg das Deutsche Klimarechenzentrum gegründet, 1988 ging es in Betrieb.

Kurz vorher hatte Paul Crutzen in Mainz bereits ein neues Gebiet der Erdsystemforschung etabliert: die Biogeochemie. Sie erforscht die Interaktionen zwischen der Atmosphäre, der Geo- und der Biosphäre. Dafür holte er Meinrat O. Andreae

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Der Erdsystemcluster in der Max-Planck-Gesellschaft betreibt Grundlagenforschung im Zusammenhang mit dem globalen Wandel, der auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist.

Das Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz untersucht seit 1968 die Atmosphärenchemie. Dort forschte seit 1980 Paul J. Crutzen, dessen Erkenntnisse zum Abbau des atmosphärischen Ozons zum Verbot von Halogenkohlenwasserstoffen beitrugen und 1995 mit dem Nobelpreis gewürdigt wurden.

Am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg wies Klaus Hasselmann ab 1975 den menschlichen Einfluss auf das Klima nach und erhielt dafür 2021 den Nobelpreis für Physik.

Seit 1997 erforscht das Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena globale Stoffkreisläufe, unter anderem von Kohlenstoff beziehungsweise Kohlendioxid. Das Max-Planck-Institut für Geoanthropologie in Jena widmet sich seit 2022 unter Berücksichtigung geistes-, sozial- und humanwissenschaftlicher Aspekte dem Einfluss des Menschen innerhalb des Erdsystems.

1987 als Direktor ans Institut, einen Experten für Stoffkreisläufe in der Umwelt. Allerdings habe Andreae zunächst Schwierigkeiten gehabt, im Präsidium der Max-Planck-Gesellschaft den neuen Begriff Biogeochemie durchzusetzen, erzählt Lax. Doch das sollte sich bald ändern.

Nach der Wende 1990, im Zuge des Aufbaus Ost, gründete die Max-Planck-Gesellschaft neue Institute in Ostdeutschland. 1994 veranstaltete sie ein International Sympo-

sium on Biogeochemical Cycles and Global Change. Der Bayreuther Biologieprofessor Ernst-Detlef Schulze skizzierte dort, wie er sich ein künftiges biogeochemisches Institut vorstellen würde. Der Pflanzenökologe hatte in den 1980er-Jahren Crutzen und Hasselmann kennengelernt. Crutzen hielt das neue Institut für notwendig, um die Wechselwirkung des Bodens mit seiner Vegetation und der Atmosphäre darüber genauer zu erforschen. „Er sagte, ohne solide Erdoberflächenmessungen hingen wir in der Luft“, sagt Schulze.

Seine Ideen für das neue Institut, das dritte große innerhalb des Erdsystemclusters, konnte Schulze ab 1997 als Gründungsdirektor in Jena verwirklichen. Die wissenschaftliche Zielsetzung ist bis heute die Erforschung globaler Stoffkreisläufe – Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff – und der dafür relevanten biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse. Auf Jena fiel die Wahl zum einen aus politischen Gründen, denn Thüringen sollte auch mit einem Max-Planck-Institut bedacht werden. Für Schulze war zum anderen das Umland von Jena wissenschaftlich interessant, da die Gegend dort geologisch und in der Vegetation vielfältig ist – ideal für Feldversuche. An dem neuen Institut plante Schulzes Team hohe Messtürme, um damit den Stoffaustausch zwischen dem Boden inklusive Vegetation und der Luft zu erforschen. So entstanden der 304 Meter hohe Zotto-Turm in der sibirischen Taiga und der 325 Meter hohe Atto-Turm im brasilianischen Amazonasregenwald. Der Max-Planck-Direktor setzte sich bei der Europäischen Union zudem für den

Aufbau eines Netzwerks von Messtürmen in Europa ein: Dieses Integrated Carbon Observation System erfasst heute die Quellen und Senken für Treibhausgase über Europa – wichtige Daten für die Klimafor-

Zum Erdsystemcluster gehören noch weitere Institute, aktuell die Max-Planck-Institute für terrestrische Mikrobiologie in Marburg und für marine Mikrobiologie in Bremen; zeitweilig war auch das Max-Planck-Institut für Aeronomie, heute Sonnensystemforschung, in Lindau beteiligt. „Die Max-Planck-Gesellschaft hat den Anspruch, neue Forschungsfelder in Deutschland hochzuziehen“, sagt der Historiker Gregor Lax. In die Erdsystemforschung ist sie im internationalen Vergleich zwar recht spät gestartet, sie hat es dann aber innerhalb nur eines Jahrzehnts an die internationale Spitze geschafft. Dabei haben ihre Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nicht nur herausragende Forschung geleistet. Sie haben mit dem Verständnis unter anderem des Ozonabbaus und des menschengemachten Klimawandels auch die Grundlage dafür gelegt, diesen Bedrohungen für das Leben auf der Erde, wie wir es kennen, wirksam begegnen zu können.

59



DAS FORSCHUNGSPROGRAMM „GESCHICHTE DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT“

Zwischen 2014 bis 2022 rekonstruierten unabhängige Historikerinnen und Historiker die Entwicklung der MPG zwischen 1948 und 2002. Dabei ordneten sie die Geschichte der MPG in die Zeitgeschichte der Bundesrepublik im Zusammenhang europäischer und globaler Entwicklungen ein.

WENN STAATEN VERSINKEN

INTERVIEW: MICHAELA HUTTERER

60

Die Malediven, Kiribati, Tuvalu oder Teile der Salomonen: Wenn der Meeresspiegel weiterhin ansteigt, werden mehrere Inselstaaten binnen weniger Jahrzehnte im Meer verschwinden. Die Einwohner werden heimatlos – bisher ohne Chance auf Asyl oder Ersatzterritorium. Der Jurist Tom Sparks vom Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht sucht Lösungen für untergehende Staaten.

Können Staaten sterben, Herr Sparks?

TOM SPARKS: Sie werden! Tuvalu im Südwesten des Pazifiks zählt zu den fünf Inselreichen, die binnen weniger Jahrzehnte untergehen werden, wenn die Klimaerwärmung weiterhin ungebremst bleibt. Der letzte Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) der Vereinten Nationen geht davon aus,

dass der Meeresspiegel bis zum Jahr 2100 um zwei Meter steigen wird. Auf den zu Tuvalu gehörenden Inseln liegt der höchste Punkt gerade einmal fünf Meter über dem Wasser.

Welche Inselstaaten sind betroffen?

Bedroht sind Inselstaaten, deren Höhe im Durchschnitt weniger als zwei Meter über dem Meeresspiegel beträgt. Das sind derzeit Kiribati und die Marshallinseln im Pazifik, die Malediven im Indischen Ozean – und eben Tuvalu. In Mikronesien sind bereits erste Inseln verschwunden. Daneben werden auch deutsche, amerikanische oder australische Inselgebiete in wenigen Jahrzehnten vom Meer verschluckt werden.

Gibt es keine Regeln für sinkende Staaten?

Leider nein. Wir haben im Völkerrecht eine rechtliche Vermutung, dass Staaten niemals sterben. Ein Staat muss aller-

dings nicht zwingend dauerhaft in derselben Form existieren. Staaten können ersetzt werden, wie zum Beispiel Rhodesien durch Simbabwe auf demselben Territorium oder die UdSSR durch Russland, zumindest für einen Teil des ehemaligen Territoriums, oder die DDR nach der Wiedervereinigung mit der Bundesrepublik. Damit sind Rhodesien, die UdSSR und die DDR zwar sozusagen verschwunden, aber es gibt Nachfolgestaaten, also Völker und Regierungen auf denselben Territorien. Wenn aber Staaten aufgrund des menschengemachten Klimawandels ihr Staatsgebiet verlieren, ist das eine ganz andere Art des Verschwindens. Dafür gibt es weder einen Präzedenzfall noch eine Lösung.

Ein Staat existiert also nur, wenn er auch ein Staatsgebiet hat?

Bislang halten wir an einem Staatsbegriff fest, der aus dem Jahr 1900 stammt. Gemäß der sogenannten Drei-Elemente-Regel von Georg Jellinek sind Bevölkerung, Regierung und Territorium

FOTO: MARIO TAMAGGETTY IMAGES



WISSEN AUS

—— UMWELT & KLIMA

Meerumschlingen: Das Atoll Funafuti mit Vaiaku, dem Hauptort des pazifischen Inselstaats Tuvalu, ist durch den Klimawandel extrem gefährdet. Wegen des steigenden Meeresspiegels wächst das Risiko von Überschwemmungen, Sturmfluten und Erosion auf allen Inseln Tuvalus.

zwingende Merkmale jedes Staates. Demnach bliebe von den Inselstaaten nicht mehr als eine Interessengruppe oder eine Fiktion, sobald sie ihr Territorium verloren haben.

Versinkt der Staat im Meer, werden seine Bewohner heimatlos. Welche Möglichkeiten haben sie, sich neu anzusiedeln?

Die Inselbewohnerinnen und -bewohner sind die Leidtragenden des Klimawandels und genießen als Staatenlose einen nur sehr geringen Schutz. Es gibt keine Pflicht, sie aufzunehmen. Ihre Aussicht auf Asyl ist gering: Als Flüchtling gilt im Völkerrecht jemand, der flieht, da er wegen seiner Rasse, Religion, Nationalität, der Zugehörigkeit zu einer bestimmten sozialen Gruppe oder seiner politischen Überzeugung verfolgt und bedroht wird. Menschen, die aus persönlichen oder materiellen Notlagen – Hunger, Krieg oder Zerstörung der Umwelt – fliehen, zählen leider nicht dazu.

reren Wohnraum auf höher liegenden Teilen des Staatsgebiets bereitstellen – zumindest wenn es solche gibt. Aber ein Land wie Tuvalu kann nicht etwa Gebiete von den Fidschiinseln oder Australien fordern, weil sein Territorium schwindet.

Der Staat Kiribati hat für seine etwa 100 000 Einwohner bereits Ersatzland auf den Fidschiinseln gekauft. Ist das eine gute Lösung?

Die Inselstaaten verhandeln sehr aktiv über neue Siedlungsräume. Auch Tuvalu sucht ein neues Staatsgebiet. Wenn Tuvalu aber etwa mit Australien darüber verhandelt, wird Australien vielleicht Grundstücke anbieten, aber keinen Staat im Staate dulden. Wo immer die Tuvaluer unterkommen, es wird ein Teil Australiens sein – mit allen Konsequenzen wie australischem Recht und australischen Steuerregeln.

Damit gewinnen Bewohner Land, verlieren aber ihre Souveränität.

Korrekt. Mit Ausnahme der Hohen See, der Antarktis und einiger umstrittener Gebiete gilt jeder Teil der Erdoberfläche als Territorium eines souveränen Staates, über das er allein seine Souveränität ausüben kann. Wir müssen Lösungen fin-

den, damit auch die betroffenen Inseln als kleinste Staaten der Welt unabhängig und eigenständig überleben können, auch wenn ihr Gebiet physisch nicht mehr existiert.

Tuvalu plant seinen Fortbestand im Internet, sollte das Meer weiter ansteigen. Ein virtueller Staat – ist das die Lösung?

Meines Erachtens eher nicht. Es gibt zwar Ideen, einen digitalen Zwilling im Metaversum nachzubauen, also in einer virtuellen Welt. Solche Ideen sind wichtig für das kulturelle Leben und Überleben eines Volkes, ersetzen aber nicht den Staat im rechtlichen Sinne.

Daneben wird auch diskutiert, die Existenz der Inselstaaten über deren maritime Rechte zu sichern. Wie geht das?

Dabei sollen die Grenzen der Meereszonen eines Staates in ihrer derzeitigen Ausdehnung „eingefroren“ werden. So könnte ein vertriebener Staat zumindest weiterhin von den natürlichen Ressourcen des Meeres profitieren – oder im schlimmsten Fall auf Grundlage seiner Souveränität über das maritime Gebiet weiterbestehen. Das allein ist aber keine befriedigende Lösung.

Was wäre also besser?

Wir brauchen zuerst schnelle Lösungen für die Klimakrise, damit es gar nicht erst zum Untergang der Staaten kommt. Klimabedingte Vertreibungen werden zunehmen: Laut Berichten der Weltbank werden allein in den afrikanischen Ländern südlich der Sahara, in Südasien und Lateinamerika bis 2050 mehr als 143 Millionen Menschen betroffen sein. Die Vereinten Nationen schätzen, dass ein globaler Temperaturanstieg von drei bis vier Grad schon durch Überschwemmungen 330 Millionen Menschen vertreiben wird. Mehr als eine Milliarde Menschen weltweit leben bereits in Slums, an empfindlichen Berghängen oder in Uferregionen mit hohem Überschwemmungsrisiko. Wir müssen die internationale Rechtsstruktur an die Auswirkungen der Erderwärmung anpassen.

→

62

Gibt es ein Recht auf ein neues Staatsgebiet?

Nein. Die Frage ist ja: Wer soll verpflichtet werden, ein neues Staatsgebiet zur Verfügung zu stellen? Innerhalb eines Inselstaats kann die Regierung siche-



Strand unter: Die Bäume in der Langa-Langa-Lagune der Salomoneninsel Malaita zeigen an, wo ehemals Land war. Bald dürfte das Haus dahinter im Meer verschwinden ebenso wie andere bewohnte Gebiete des Inselstaats.

Steigende Pegel im Blick: Der Jurist Tom Sparks beschäftigt sich mit den Herausforderungen, die der Klimawandel für das internationale Recht mit sich bringt.

FOTO: ANNA ZIEGLER FÜR MPF





Symbolischer Akt: Im Meer stehend, gab Simon Kofe, Außenminister des Inselstaats Tuvalu, seine Erklärung zur UN-Klimakonferenz in Glasgow 2021 ab. Bilder davon wurden vielfach in den sozialen Medien geteilt und machten den Kampf der Tuvaluer gegen steigende Meeresspiegel publik.

Wie kann das gelingen?

64

Wir müssen über die Territorialität hinaus blicken und das Konzept der Staatlichkeit neu denken. Es ist ein bisschen schwer, sich das vorzustellen. Staaten erscheinen uns absolut fest und unveränderlich, aber das Verständnis, was einen Staat ausmacht, hat sich schon mehrfach geändert. Wir sehen zum Beispiel den Staat nicht mehr als persönliches Eigentum des Königs – selbst in den Staaten, die noch Königshäuser haben. Und der Staatsbegriff wird sich auch in Zukunft weiterentwickeln, wenn wir unser Denken verändern. Staaten sind eine soziale Struktur, die durch soziale Aktivitäten geschaffen und aufrechterhalten werden. Dieser Gedanke sollte künftig das Staatsverständnis prägen, wir dürfen nicht länger am Gebiet als Voraussetzung für das Bestehen eines Staates festhalten.

Kommt das nicht einem Bruch mit bestehenden Ansichten gleich?

Vielleicht. Doch wir müssen auch die Herausforderungen unserer Epoche erkennen. Wir leben längst nicht mehr im Holozän, in dem Umwelt und Klima von äußeren Umständen wie Asteroidenein-

schlägen, seismischer und vulkanischer Aktivität geprägt wurde. Mittlerweile leben wir im Anthropozän, einer neuen globalen Epoche, in welcher der Mensch die zentrale Rolle für die Entwicklung von Umwelt und Klima spielt. Unser Lebensstil lässt CO₂-Emissionen ansteigen. In der Folge wandelt sich das Klima und ruft immer schwerere Wirbelstürme, Dürren, Überschwemmungen, Hitze- und Kältewellen sowie Flächenbrände hervor. Gletscher schmelzen, der Meeresspiegel steigt, Ozeane versauern, Böden versalzen und Grundwasserspiegel sinken. Diesen Umständen kann das Jellinek'sche Territorialitätsprinzip im Recht nicht mehr Rechnung tragen.

Was macht dann einen Staat aus?

In erster Linie seine Selbstbestimmung. Es braucht eine Gruppe, das Volk, und eine Regierung aus der Gruppe, die das Volk führt. Das Staatsgebiet ist ein Mittel, um diese Selbstbestimmung umzusetzen: Klare Gebietsgrenzen helfen, die Regeln für eine bestimmte Gruppe aufrechtzuerhalten. Was ein Staat ist, entscheidet jedoch nicht die geografische Linie im Sand, sondern die Existenz einer Gemeinschaft. Tuvalu hat eine Regierung, und es gibt 11 000 Tuvaluer, die sich diesem Staat zugehörig fühlen. Sie wollen nicht Australier oder Fidschianer werden, sondern ihre Identität behalten.

„Ein Land wie Tuvalu kann nicht Gebiete von Australien fordern, weil sein Territorium verschwindet.“

TOM SPARKS

Das muss ein modernes Völkerrecht erkennen und würdigen.

Reicht es also, dass die UN-Vollversammlung sagt, Tuvalu besteht weiter – auch ohne Territorium?

Das kann man nicht mit Sicherheit sagen, aber zweifellos würde das einen Beitrag leisten. Allerdings sind noch viele Fragen ungeklärt. Das sind wichtige Forschungsfragen. Wir müssen die Zeit nutzen, um Lösungen zu erarbeiten für die Staaten, deren Lebensgrundlage der Ozean ist. Nicht umsonst haben sie sich einen neuen Gruppennamen gegeben: „Large Ocean States“.

Und diese Staaten sind sehr aktiv. Die Inselrepublik Vanuatu hat jüngst einen wichtigen Erfolg erzielt: Auf ihren Antrag hin hat die UN-Vollversammlung den Internationalen Gerichtshof (IGH) eingeschaltet.

Wir erwarten davon eine Reihe von Antworten auf wichtige rechtliche Fragen. Vanuatu hat mit siebzehn weiteren Antragstellern und 132 Unterstürzerstaaten den IGH um eine Stellungnahme gebeten, welche völkerrechtlichen Verpflichtungen Staaten zum Schutz des Klimas haben und welche rechtlichen Folgen sich ergeben, wenn Staaten das Klima nicht ausreichend schützen. Ich als Klimajurist finde das extrem spannend! Eine solche Stellungnahme könnte einen enormen Beitrag leisten zu unserem Verständnis, welche Pflichten Staaten im Umgang mit dem Klimawandel haben. Meiner Meinung nach schuldet die Welt Vanuatu großen Dank, besonders den Jugendaktivisten, die die Kampagne für das Gutachten gestartet und zu einem positiven Abschluss gebracht haben.

Auch in Hamburg beschäftigen sich Richter mit dem Klimawandel ...

Der Internationale Seegerichtshof in Hamburg wird alsbald in einem Gutach-

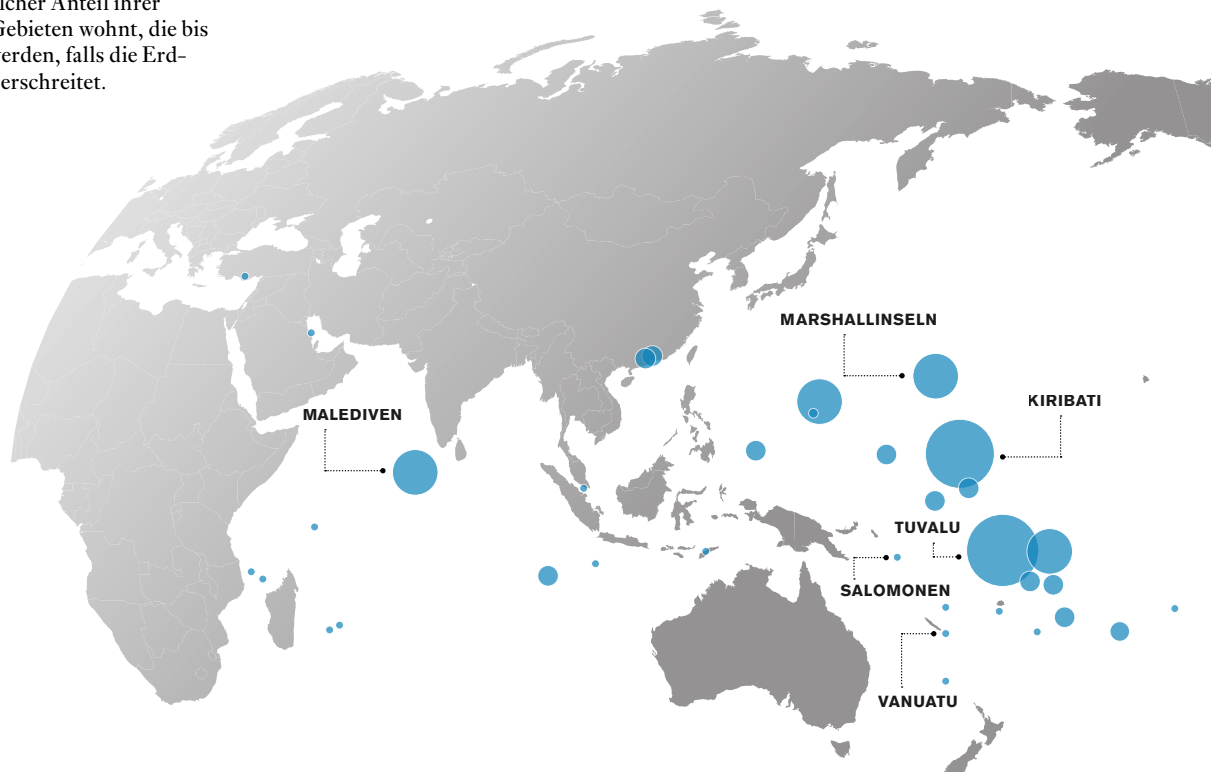
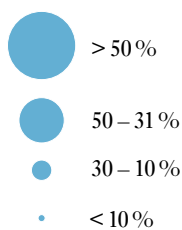
ten klären, welche Seerechte untergegangene Staaten haben. Das könnte auf wichtige Fragen zum Fortbestand der Meereszonen Antworten geben und den Druck auf Regierungen weltweit erhöhen, mehr für den Klimaschutz zu tun.

Wie lange haben wir noch Zeit?

Nicht viel! Sehr bald wird sich zeigen, ob unsere Anstrengungen, die Erderwärmung zu stoppen, fruchten: In den nächsten fünf bis zehn Jahren werden wir ganz klar sehen, ob wir einen relativ sicheren Pfad eingeschlagen haben und den Klimawandel stoppen oder ob wir direkt in die Katastrophe fahren – ökologisch und menschlich. Wir stehen angesichts des Klimawandels vor einer unvorstellbaren Migrationswelle, nicht nur aus wenigen Inselstaaten. Und dann wird die Migration alle Länder treffen, auch die, die weit weg von Polynesien sind. Jetzt haben wir noch Zeit, etwas zu ändern!

Karte der Gefährdung: Vor allem im Pazifik sind Inselstaaten vom Klimawandel bedroht. Diese vom IPCC veröffentlichte Darstellung zeigt für einige der Staaten, welcher Anteil ihrer Bevölkerung aktuell auf Gebieten wohnt, die bis ins Jahr 2100 überflutet werden, falls die Erderwärmung zwei Grad überschreitet.

ANTEIL DER BEVÖLKERUNG, DIE VON ÜBERFLUTUNGEN BEDROHT IST





66

Doppelter Nutzen: An zweibeinigen Robotern untersucht ein Stuttgarter Max-Planck-Team die Biomechanik etwa von Laufvögeln. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse helfen den Forschenden auch, den Gang von Robotern zu verbessern.

FOTO: WOLFRAM SCHEIBLE, FÜR MPG

LAUF, ROBOTER!

TEXT: DAVID HOLZAPFEL

Gehen und laufen, ohne zu stolpern, das ist für zweibeinige Roboter vor allem in unebenem Gelände noch immer eine Herausforderung. Künftig könnte es ihnen jedoch leichter fallen: Ein Team um Alexander Badri-Spröwitz, Forschungsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme, hat einen Laufroboter konstruiert, der von Laufvögeln inspiriert ist. In Zukunft könnten solche Maschinen auf Baustellen, in der Landwirtschaft oder auch bei Missionen der Raumfahrt zum Einsatz kommen.

Alexander Badri-Spröwitz setzt den Roboter auf das Laufband. Noch hält er ihn mit einer Hand fest. Die beiden Beine der Maschine strampeln im Takt ihrer Elektromotoren, es sieht aus, als wollte sie sich aus dem Griff des Forschers befreien. Badri-Spröwitz schaltet das Laufband ein. Er tippt auf einem Laptop herum. Der Roboter zuckt etwas unkoordiniert, zieht sein linkes Bein nach. „Er ist heute ein bisschen schüchtern“, sagt der Wissenschaftler und blickt auf den Bildschirm. Nächster Versuch. Die Maschine läuft. Ein wenig ungenau bewegt sie sich Schritt für Schritt über das Laufband – zumindest für

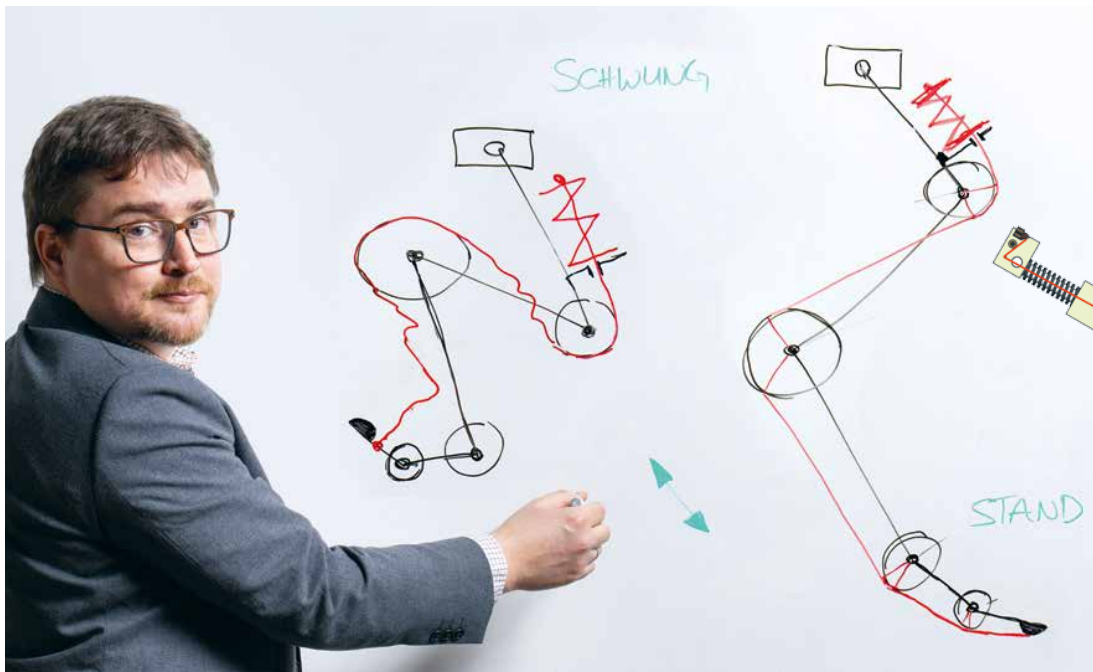
einige Sekunden. Dann fängt sie an zu hinken. Badri-Spröwitz nestelt am linken Bein des Roboters herum. Dann hat er das Problem gefunden: Der Kniemotor zieht nicht richtig. Eine kleine Justierung, schon läuft BirdBot wieder los – und diesmal hinkt er nicht.

BirdBot, so heißt das System von Roboterbeinen, das Badri-Spröwitz und sein Team am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Stuttgart entwickelt haben. Die Forschenden vereinen Biologie und Robotik im Bereich der Biomechanik. Sie wollen die Natur besser verstehen. Und von ihr lernen. Geht es nach Alexander Badri-Spröwitz, so könnte BirdBot der Prototyp sein für eine neue Art von Laufrobotern. Energieeffizienter als bisherige Roboter könnten diese in Zukunft zum Beispiel auf Baustellen schwere Lasten tragen. Anstelle von großen Maschinen mit viel Gewicht und mächtigen Rädern laufen mög-

licherweise bald leichtfüßige Roboter auch über Felder und Äcker. Sie könnten Äpfel ernten oder bei der Weinlese helfen. Auch in der Raumfahrt sieht Badri-Spröwitz Einsatzmöglichkeiten. „Wir glauben, dass ein Roboter über mobile Solarmodule mit genügend Energie versorgt werden kann, um den Mond oder den Mars zu erkunden oder beim Bau einer Mondstation zu helfen.“ Zweibeinige Roboter sind dabei leichter als vier- oder sechsbeinige, brauchen weniger Platz – etwa zwischen Bäumen oder Regalen – und können, wenn sie als humanoide Roboter mit Armen ausgestattet sind, meistens höher greifen. Der Mechanismus von BirdBot lässt sich aber auch in mehrbeinigen Maschinen einsetzen.

Biologen wissen schon lange, dass Tiere sehr energieeffizient laufen, springen, fliegen und schwimmen. Seit es Leben auf unserem Planeten gibt, hat die Evolution zahllose Lösungen für





Spannende Sache: Alexander Badri-Spröwitz skizziert die entscheidende Neuerung an BirdBot. Diese besteht darin, dass sich eine Sehne (rot) von einer Feder am Oberschenkel über alle Gelenke bis zum Fuß des Roboters zieht. Im Stand (rechte Skizze) sind Sehne und Feder gespannt, sodass kein Motor nötig ist, um das Gewicht zu tragen. Wenn BirdBot sein Bein anzieht (linke Skizze und Grafik), klappt er den Fuß nach hinten. Dann entspannen sich Sehne und Feder, und der Roboter kann das Bein mit relativ wenig Kraftaufwand anziehen.

68

alle möglichen Herausforderungen gefunden. Dabei hat die Natur auch schon viele der Probleme gelöst, die sich uns heute in der Technik stellen. Wir müssen nur aufmerksam hinschauen.

Da sind zum Beispiel der Strauß und der Emu. Laufvögel wie sie sind mechanische Wunderwerke. Sie wiegen teils über 100 Kilo und rennen doch mit einer Geschwindigkeit bis zu 55 Kilometern pro Stunde durch die Savanne. Ein früher Erfolg der Evolution, denn schon vor 66 Millionen Jahren lief ein Tyrannosaurus Rex, sechs bis sieben Tonnen schwer, mit einer fast identischen Beinstruktur.

Doch die Wissenschaft weiß erstaunlich wenig darüber, wie sich die Tiere im Detail bewegen. Es gibt viel Forschung dazu, aber auch noch sehr viele Fragen. Biomechaniker beschreiben zwar Bewegungsabläufe und messen Kräfte und Gelenkbewegungen. „Doch vieles ist noch un-

klar“, sagt Badri-Spröwitz. Wie funktionieren die Muskeln? Wie nutzen sie Energie? „Warum die Tiere so energieeffizient sind, das ist bei Weitem noch nicht erklärt.“

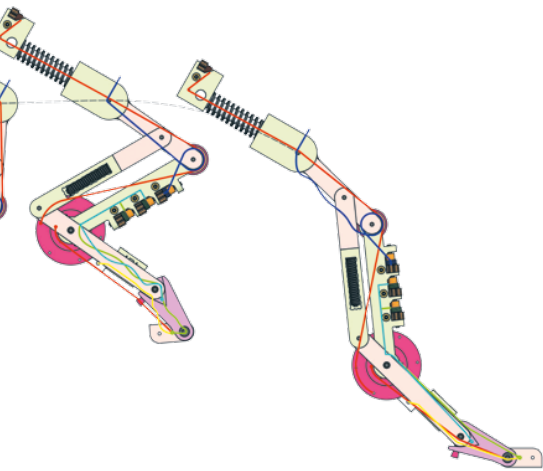
Vom Emu-Kadaver zum Robotermodell

Und es gibt einige Entwicklungen, die auf den ersten Blick wie Kuriositäten wirken: Anders als Menschen klappen viele Vögel den Fuß nach hinten, während sie das Bein zum Körper hochziehen. Doch die Natur macht nichts zufällig. Warum also tun die Tiere das? Ist diese Fußbewegung beim Gehen und Rennen vielleicht besonders energieeffizient? BirdBot soll Antworten auf solche Fragen liefern.

Auch der Laufroboter selbst profitiert davon. Denn immer wieder wurde er nach neuen Erkenntnissen, beispielsweise warum genau sich Laufvögel so

effizient fortbewegen, optimiert – dabei waren weitere Fragen zu beantworten. Etwa: Wie lässt sich der Aufbau der Vogelbeine mit all ihren Knochen, Muskeln und Sehnen auf Laufroboter übertragen? Seit mehreren Jahren forscht Badri-Spröwitz dazu. Das vorläufige Ergebnis steht nun vor ihm in seinem Stuttgarter Labor. BirdBot ist rund 35 Zentimeter hoch, mit seinen langen Beinen, den Elektromotoren und den Plastikbauteilen sieht er ein bisschen aus wie ein futuristisches Kinderspielzeug.

Die Geschichte des Roboters beginnt im Jahr 2014. Badri-Spröwitz sitzt in einem Labor am Royal Veterinary College in London. Auf dem Seziertisch vor ihm liegt der Kadaver eines Emus; ein wuchtiges Tier – einer der größten Laufvögel der Welt. Alexander Badri-Spröwitz bewegt ein Gelenk am Bein des Vogels, und zu seiner Überraschung sieht er, dass sich die anderen Gelenke mitbewegen. Ungefähr so,



Inspiziert von einem ungesicherten Vorbild: Der Gang von BirdBot ähnelt dem eines Laufvogels (hier: ein Strauß). Ungeklärt ist allerdings noch, ob der Vogel den Fuß ebenfalls zu dem Zweck zurückklappt, eine Sehne zu entspannen und damit beim Laufen Energie zu sparen.

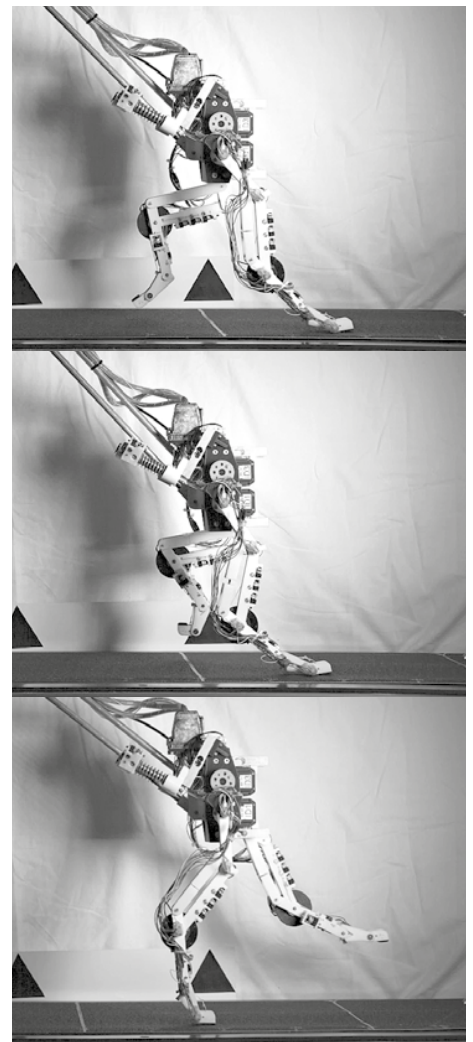
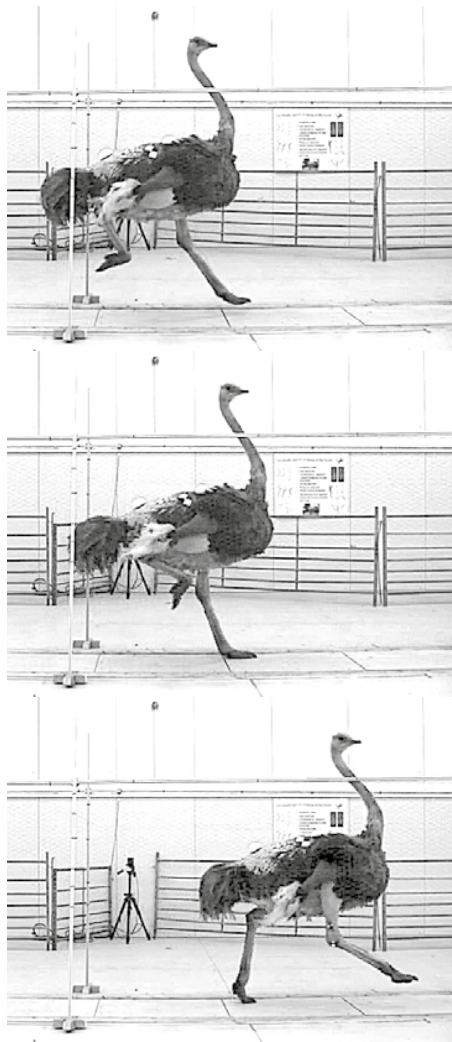


BILD: DLG MPI-IS & UC IRVINE UND MONICA DALEY, RVC

69

wie wenn man bei einer Marionette mehrere Fäden gleichzeitig zieht. Weil das Tier tot ist und folglich keine neuronalen Reflexe mehr zeigen kann, ist Badri-Spröwitz davon überzeugt, dass die Gelenke des Emus durch Sehnen mechanisch miteinander verbunden sind.

Und der Forscher sieht noch etwas anderes: Wenn er ein Bein des toten Emus so anwinkelt, als würde der Vogel laufen, dann klappt der Fuß nach hinten. Könnte dieser Mechanismus erklären, warum ein so großes Tier nicht nur sehr schnell rennen, sondern auch über Stunden hinweg mühelos stehen kann? Badri-Spröwitz ist neugierig geworden. Er hat jetzt eine These, die er überprüfen kann.

Helfen soll ihm dabei ein mechatronisches Modell der Laufvogelbeine. Im September 2017 beginnen Badri-Spröwitz und sein Doktorand Alborz Aghamaleki Sarvestani damit, BirdBot zu konstruieren. Übersetzen Biomechaniker die Natur in Technik, müssen sie jedoch vereinfachen. Zu komplex sind die Bewegungsabläufe von Tieren, bei denen Skelett, Muskeln, Sehnen und Faszien miteinander interagieren. Alles in Sekundenbruchteilen und millimetergenau. „Der Transfer in die Mechatronik ist schwierig“, sagt Badri-Spröwitz.

Bis heute schaltet sich bei zweibeinigen Robotern in der Standphase meist ein Motor am Kniegelenk ein, der gegen die Schwerkraft arbeitet und das Ge-

wicht der Maschine trägt. Geht der Roboter, schaltet sich der Motor aus, wenn das Bein nach vorne schwingt, und schaltet sich wieder ein, kurz bevor der Fuß erneut den Boden berührt. Ein energieaufwendiges Wechselspiel, das von Sensoren präzise kontrolliert werden muss. Denn damit der Roboter nicht stürzt, muss der Motor zum jeweils richtigen Zeitpunkt arbeiten und pausieren – also innerhalb weniger Millisekunden umschalten. Das macht diese Art von Robotern fehleranfällig. Wie solche Fehler aussehen, das lässt sich auf Youtube bestaunen. Zwischen 2012 und 2015 veranstaltete die Defense Advanced Research Projects Agency (Darpa), eine Behörde des US-Verteidigungsministeriums zur Forschungsförderung,



einen internationalen Robotikwettbewerb, eine Art Weltmeisterschaft der Roboter. Das Preisgeld war hoch, das Renommee der Teilnehmenden ebenso. Die Roboter sollten zum Beispiel Hindernisparcours bewältigen, Treppen steigen oder Auto fahren. Nicht immer klappte das. In Videos, unterlegt mit fröhlichem Klaviergekläpper, ist beispielsweise zu sehen, wie ein Roboter nach einem Ventil greift, danebenlangt und wie ein Betrunkener nach links kippt. Ein anderer Film zeigt einen Roboter, der aus einem Quad steigen will, zu wackeln anfängt und schließlich ungebremst auf den Boden plumpst. Auch das Laufen funktioniert nicht reibungslos: Da ist ein Roboter, der sein linkes Bein nach vorne beugt – nur um gleich darauf zu torkeln und nach hinten umzukippen. All das ist lustig anzusehen und zeigt: Es ist gar nicht so einfach, einen bewegungsfähigen Roboter zu entwickeln.

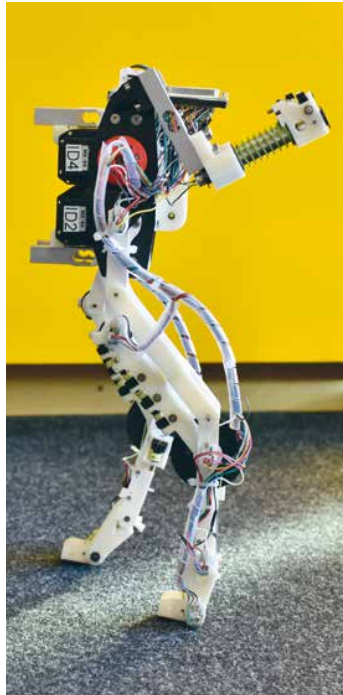


FOTO: WOLFRAM SCHEIBLE FÜR MPG

Beine statt Räder: Mit dem Mechanismus von BirdBot könnten große Roboter etwa auf dem Bau oder in der Landwirtschaft arbeiten.

BirdBot als Schalter, um die Feder im Lauf zu deaktivieren. Durch die Bewegung des Fußes wird die Sehne verlängert und die Spannung aus der Feder genommen. Das funktioniert in etwa wie bei einer Wackelfigur: Diese fällt in sich zusammen, wenn man einen Knopf in ihrem Sockel drückt. Beim Roboter bewirkt ein ähnlicher Mechanismus, dass er in der Schwungphase das Bein hochziehen kann, ohne gegen die Feder zu arbeiten. Das Bein schwingt dann lose. Anstelle der üblichen vier Motoren braucht BirdBot daher nur noch zwei pro Bein – einen am Hüftgelenk und einen zum Beugen des Knies in der Schwungphase. Den Rest macht das Bein von selbst. Ob Laufvögel sich jedoch wirklich nach einem ähnlichen Prinzip fortbewegen, muss die Biologie jetzt noch überprüfen. Denn die Interpretation, dass der zurückklappende Fuß eine Sehne entspannt, die dem Emu und dem Strauß beim Stehen Halt gibt, ist Alexander Badri-Spröwitz zufolge neu. Dem Roboter

70

Der Fuß als Schalter, der das Bein freigibt

Daher verfolgt Badri-Spröwitz einen anderen Ansatz, um einem Roboter in die Gänge zu helfen. Er orientiert sich am Bewegungsapparat des Emus, den er in London untersucht hat. Den Fuß des BirdBot-Roboters entwirft er so, dass dieser über Seilzüge aus künstlichen Sehnen und Rollen mechanisch mit den restlichen Beingenelenken verbunden ist. Wo andere Roboter einen Motor zum Stehen brauchen, genügt BirdBot eine einfache Feder, die das Gewicht trägt. Das spart Energie – aber nur beim Stehen. Beim Laufen, genauer gesagt: beim Anziehen des Beins, würde die steife Feder die Bewegung behindern und sogar mehr Energie kosten. Da der Motor dabei gegen sie anarbeiten müsste, würde er überlastet.

Doch auch dieses Problem hat Badri-Spröwitz gelöst und sich dabei wieder an der Biologie orientiert. Im Stuttgarter Labor erklärt er, wie er die Lösung fand: Im Grunde liefen die meis-

ten Roboter, die Beine haben, wie Menschen. Stark vereinfacht, funktionieren sie so: Wenn wir das Bein anziehen, damit es nicht über den Boden schleift, spannen wir die Muskeln an, die das Bein beugen. Die Muskeln, die es strecken, sind dabei entspannt. Wenn wir das Bein nun nach vorne schwingen, kann es sich frei bewegen. Beim Stehen dagegen sind die Streckmuskeln gespannt. Gehen wir, schalten wir zwischen diesen beiden Modi hin und her. Die Laufvögel, die – anders als der Mensch – ohne Muskelarbeit stehen können, gehen offenbar etwas anders. Der Unterschied, so vermutet Badri-Spröwitz, könnte ihm auch helfen, das Problem mit der blockierenden Feder im Roboter zu lösen. Die entscheidende Frage, die er sich stellt: Warum klappt der Emu im Lauf seine Füße nach hinten?

In der Biologie ist diese Frage bislang nicht abschließend geklärt. Badri-Spröwitz hat jedoch eine Vermutung. Daher konzipiert er den Zeh von



FOTO: DLG MPLIS & UC IRVINE

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Laufvögel können ohne Anstrengung stehen und trotz ihres hohen Gewichts schnell und effizient rennen. Der Grund dafür könnte in der Konstruktion des Sehnenapparats der Beine liegen, wie ein Max-Planck-Team herausgefunden hat.

Nach dem Vorbild von Laufvögeln haben die Forschenden einen energieeffizienten Roboter konstruiert, der sich mit weniger Elektromotoren und mit weniger Steuerungsaufwand fortbewegt als herkömmliche zweibeinige Roboter.

Der Fortbewegungsmechanismus erlaubt es, größere Roboter zu konstruieren, als es bisher möglich ist. Solche Roboter könnten – beispielsweise auf Baustellen oder in der Landwirtschaft – schwere Maschinen ersetzen.

jedenfalls spart der Mechanismus Energie: „Im Vergleich zu anderen Laufrobotern benötigt BirdBot beim Gehen nur ein Viertel der Energie“, erklärt Badri-Spröwitz.

Noch liegt viel Arbeit vor dem Forschungsteam. Badri-Spröwitz will in Zukunft noch mehr biologische Mechanik in BirdBot einbauen – zum Beispiel drei Zehen, die den Roboter stabilisieren. „Schon der T-Rex hatte drei große Zehen, deren Anordnung für das Gehen und Jagen wahrscheinlich effizient und funktional war“, erklärt er. „Die Tiere konnten wahnsinnig groß werden und auch im Morast laufen und springen“, sagt er. Davon ist BirdBot noch weit entfernt. Wie die Zukunft aussehen könnte, zeigen die Forschenden in einem Nebenraum des Stuttgarter Labors. An der Wand hängt ein zwei Meter langes Modell eines BirdBot-Beines, gefertigt aus massivem Holz. Roboter mit so langen Beinen gibt es bislang nicht, weil sie sich nicht mit Elektromotoren

ausstatten lassen, die das entsprechende Gewicht bewegen könnten. „Mit unserer Technik gibt es aber keine Größenbeschränkung für die Roboter“, erklärt Badri-Spröwitz und deutet auf das Modell. Das Feder- und Gelenksystem nimmt einen Großteil der Last von den Motoren.

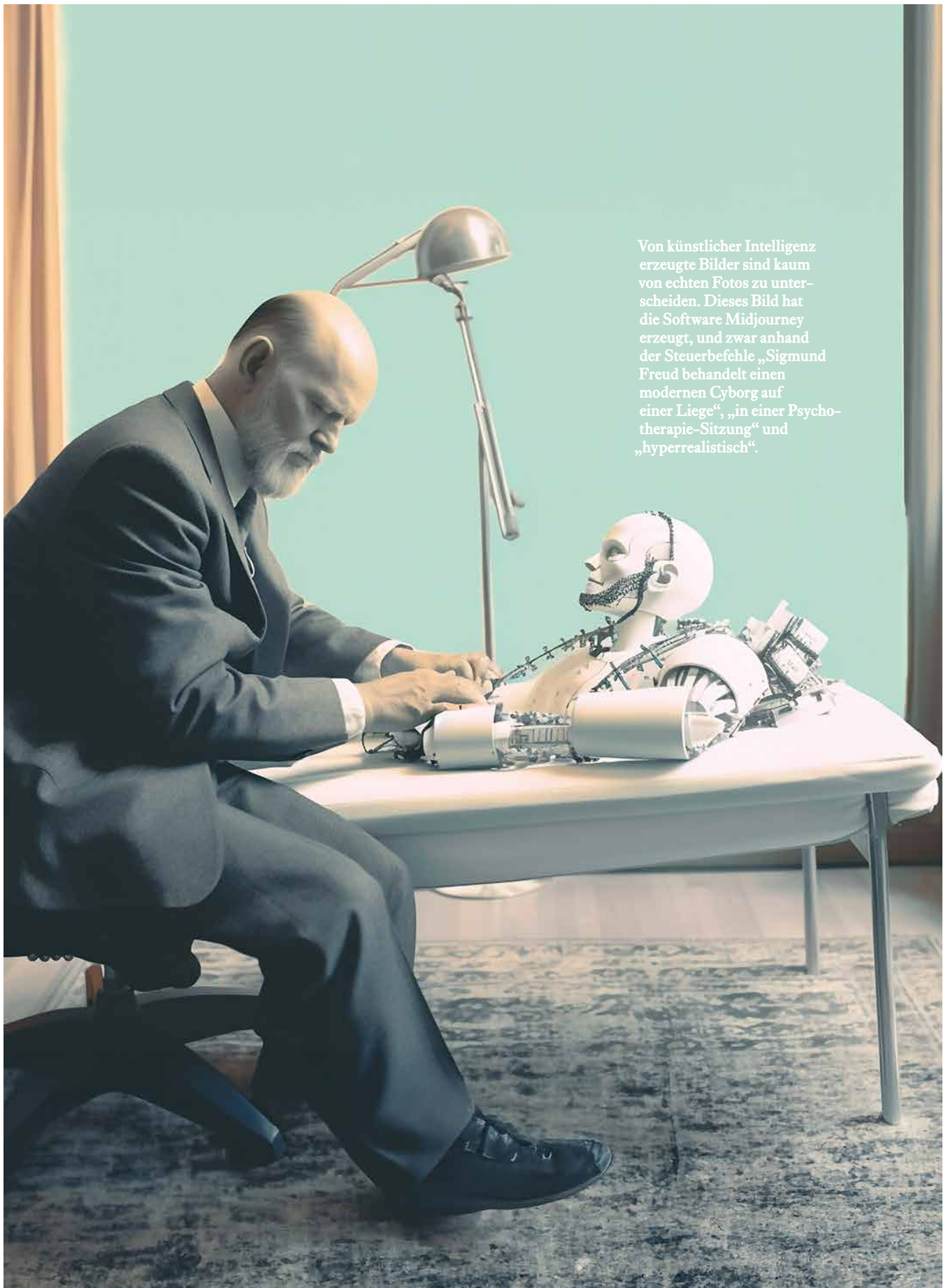
Am Max-Planck-Institut betreiben Badri-Spröwitz und sein Team Grundlagenforschung zu neuen Fortbewegungsmöglichkeiten von Robotern. Derweil bringen erste Unternehmen bereits zweibeinige Roboter auf den Markt. Da ist zum Beispiel Atlas, ein 1,5 Meter großer und 80 Kilo schwerer Roboter der US-amerikanischen Firma Boston Dynamics. Er kann sich sowohl in Gebäuden als auch im Gelände frei bewegen, kann Kisten vom Boden aufheben oder aus dem Lauf heraus über einen Baumstamm springen. Anders als bei BirdBot funktioniert der Betrieb seiner Mechanik hydraulisch. Diese ermöglicht Atlas menschenähnliche Bewegungen und gibt ihm viel Kraft, eine Überlastung der Motoren ist bei ihm kein Thema. Doch der kräftige Bewegungsapparat macht den Roboter auch gefährlich für Menschen. Außerdem ist seine aufwendige Steuerung ziemlich fehleranfällig. Roboter, die dank des BirdBot-Mechanismus energieeffizient mit Elektromotoren laufen, böten da eine sicherere und zuverlässigere Alternative. Welches System besser geeignet ist, das hängt auch vom Einsatzgebiet ab. Bleibt die Frage, ob wir energieeffiziente Roboter auf Baustellen, als Erntehelfer oder im Weltraum noch erleben werden. Da lacht Alexander Badri-Spröwitz und sagt: „Auf jeden Fall. Das wird gar nicht mehr so lange dauern.“

71



Spielwiese für Techis: Alborz Aghamaleki Sarvestani hat BirdBot in seiner Doktorarbeit zum Laufen gebracht und den Gang in Experimenten auf dem Laufband analysiert. So hat er etwa mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (Bildmitte) Zeitlupenfilme des Roboters gedreht.

Von künstlicher Intelligenz erzeugte Bilder sind kaum von echten Fotos zu unterscheiden. Dieses Bild hat die Software Midjourney erzeugt, und zwar anhand der Steuerbefehle „Sigmund Freud behandelt einen modernen Cyborg auf einer Liege“, „in einer Psychotherapie-Sitzung“ und „hyperrealistisch“.



KÜNSTLICHE INTELLIGENZ AUF DER COUCH

TEXT: UTE EBERLE

Seit der Veröffentlichung von ChatGPT Ende 2022 wird intensiv darüber diskutiert, ob die künstliche Intelligenz bereits menschenähnliche Denkfähigkeiten besitzt. Eric Schulz vom Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen untersucht mithilfe psychologischer Tests, ob dieser Algorithmus Anzeichen einer allgemeinen Intelligenz aufweist.

Eric Schulz ist Kognitionswissenschaftler, er ist also an Denkprozessen im Gehirn des Menschen interessiert. Derzeit beschäftigt er sich mit dem Innenleben von Intelligenz, die ebendieses Gehirn erschaffen hat. „Ich wollte immer schon verstehen, wie Menschen ticken. Jetzt frage ich mich: Wie tickt eigentlich künstliche Intelligenz?“ Um das herauszufinden, unterzieht Schulz die künstliche Intelligenz (KI) klassischen kognitionswissenschaftlichen Experimenten. Seine Ergebnisse haben in ihm die Erkennt-

nis reifen lassen, dass wir Vorsichtsmaßnahmen einführen sollten, wenn wir solche Systeme in unseren Alltag integrieren. Zum Beispiel, dass immer erkennbar sein muss, wann sie zum Einsatz kommen. Nicht weil er glaubt, dass künstliche Intelligenz die Macht übernimmt – eine Sorge, die er oft spürt, wenn er sich mit anderen Menschen über seine Forschung unterhält. Schulz hat da wenig Bedenken. Kritisch sieht er eher die Geheimniskrämerei der Unternehmen, die künstliche Intelligenz entwickeln.

Schulz' Erfahrungen basieren bisher vor allem auf GPT-3, also dem System, das bis Mitte vergangenen Jahres eines der fortschrittlichsten war. GPT-3 arbeitet noch ohne die Chat-Komponente von ChatGPT und ohne Bilder, die GPT-4 nutzt. Diese beiden Programme wurden in den vergangenen Monaten kurz hintereinander öffent-

lich gemacht, begleitet von Konkurrenzversionen wie Bard von Google. Doch all diese Systeme folgen demselben Grundprinzip. Es sind Sprachmodelle, die auf statistischen Wahrscheinlichkeiten in menschlichen Äußerungen beruhen. Man kann das etwa so illustrieren: Durchsuchen die Sprachmodelle ihre Datenbanken beispielsweise nach „Onlineshopping verführt vor allem durch ...“, stoßen sie oft auf Folgebegriffe wie „Angebotspreise“, „Bequemlichkeit“ oder „Auswahl“ und wählen diese dann aus. Und da die Sprachmodelle mit riesigen Textmengen trainiert werden – im Fall von GPT buchstäblich mit dem Inhalt des gesamten Internets –, können sie mittlerweile zu jedem Thema Textbeispiele produzieren, von kurzen Antworten bis zu ganzen Büchern. Auch Nachrichten-Apps arbeiten so, wenn sie dem Nutzer Folgebegriffe vorschlagen.

Wie gut diese Vorgehensweise funktioniert, überrascht selbst Experten. „Aber sie macht künstliche Intelligenz auch anfällig. So unterlaufen ihr häufig dieselben Logikfehler wie Menschen“, sagt Eric Schulz. Zum Beispiel in einem klassischen Test der Kognitionspsychologie: Eine junge Frau namens Linda interessiert sich für soziale Gerechtigkeit, außerdem ist sie Atomkraftgegnerin. Was ist nun wahrscheinlicher: dass Linda in einer Bank arbeitet oder dass sie in einer Bank arbeitet und darüber hinaus aktive Feministin ist? Menschen wählen meist instinktiv die zweite Antwort. Doch die ist falsch, denn es ist weniger wahrscheinlich, dass zwei Bedingungen erfüllt sind (Linda ist Bankangestellte und Feministin) als nur eine (Linda ist Bankangestellte). GPT-3 wählt ebenfalls die falsche Antwort. „Es macht genau den gleichen Fehler wie Menschen“, sagt Schulz. Er vermutet, dass dies daran liegt, dass das „Linda-Problem“ sehr häufig zitiert wird. „Wahrscheinlich hat das System oftmals die falsche Antwort gelesen.“

74

Künstliche Intelligenz mit Schwächen

Doch GPT-3 hat noch weitere Schwachstellen. Kausale Beobachtungen, also wie Ursache und Wirkung in der realen Welt zusammenhängen, liegen ihm beispielsweise gar nicht. „Selbst mein einjähriger Sohn ist da schon um einiges besser. Er muss nur einmal auf einen Lichtschalter drücken, um zu erkennen, dass er das Licht auf diese Weise an- und ausknipsen kann.“ Künstliche Intelligenz kann das hingegen noch nicht. Fragt man die Programme zum Beispiel, was passiert, wenn man einen von drei Schaltern betätigt, der als einziger ein Lichtschalter ist, dann weiß sie die Antwort nicht. „Möglicherweise liegt das daran, dass künstlicher Intelligenz noch der Zugang zur realen Welt fehlt“, meint Schulz. Ein weiterer Grund könnte sein, dass die Algorithmen anders lernen als der Mensch. „Sie sauen

gen nur Wissen auf, aber sie sind nicht neugierig, und sie erkunden nicht“, sagt Schulz. „Anders als mein Sohn ziehen sie also nicht los und probieren einfach mal aus, was passiert, wenn sie auf einen Schalter drücken.“

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Künstliche Intelligenz durchforstet riesige Datenmengen nach Textbausteinen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zusammenhängen. Auf diese Weise kann sie in vielen Fällen Fragen korrekt beantworten. Die Programme erkennen jedoch noch keine logischen Zusammenhänge und Ursache-Wirkung-Beziehungen.

Die Antworten von ChatGPT werden von Stimmungen beeinflusst. Wird das Programm etwa mit Fragen konfrontiert, die beim Menschen Angst auslösen können, enthalten seine Antworten Vorurteile.

Die wenigen Firmen, die die Entwicklung von KI kontrollieren, verhalten sich sehr intransparent. Ohne Einblick in die Daten und Trainingsprotokolle, die für ein System verwendet wurden, lässt sich aber die Funktionsweise der Algorithmen nicht nachvollziehen.

Eine andere Entdeckung, die Schulz und sein Team gemacht haben, scheint dagegen weniger zu diesem „Datenstaubsauger“ zu passen. Denn künstliche Intelligenz wird von einem Phänomen beeinflusst, das man bei einer Maschine eher nicht vermuten würde: Emotionen. Die Forschenden unterzogen GPT verschiedenen Tests, die zeigen, wie ein Gefühlszustand das Denken und die Sicht auf die Welt verändert. Menschen haben beispielsweise mehr Vorurteile und sind feindseliger gegenüber Minderheiten eingestellt, wenn sie sich ängstlich fühlen. Sind sie dagegen entspannt, dann

steigt ihre Toleranz. Überraschenderweise konnten Eric Schulz und sein Team den gleichen Effekt auch bei GPT nachweisen. „Wenn künstliche Intelligenz ein Szenario entwirft, das Angst macht, drückt sie anschließend mehr Vorurteile aus“, erklärt der Forscher. Und selbst Aufgaben, die gar nichts mit der Sache zu tun haben, löst sie dann schlechter. „Entspannte – man könnte auch sagen: glückliche – künstliche Intelligenz funktioniert also besser.“ Noch haben die Forschenden keine Erklärung für dieses Phänomen. Es könnte sein, dass Angst im Internet häufig mit Rassismus verknüpft ist und das Modell aus diesem Grund ebenfalls beides zusammenführt. Diese Voreingenommenheit hält allerdings nur während einer Sitzung an. Startet man GPT neu, ist sie wieder weg. Da vorher genau festgelegt ist, wie das Programm lernt, und da es auch nicht weiterlernt, verändert es sich selbst nicht dauerhaft.

Eric Schulz und sein Team wollen künstliche Intelligenz nun dafür nutzen, menschliches Verhalten zu untersuchen, zum Beispiel im sogenannten Gefangenendilemma, einem beliebten Modell der Spieltheorie. Und die Forschenden möchten herausfinden, ob künstliche Intelligenz durch Feedback lernen kann, besser zu werden – also beispielsweise ungenaue Eingaben richtig zu interpretieren, wenn diese mehrfach wiederholt werden. An einem System der neuesten Generation betreiben die Forschenden zudem regelrechte Neurowissenschaften und untersuchen, welche Rolle die Stärke der Verbindungen innerhalb des Netzwerks spielen. Dazu arbeiten sie mit Llama, einer künstlichen Intelligenz mit 65 Milliarden Parametern.

Psychotherapie durch den Algorithmus

Künstliche Intelligenz wird viele Lebensbereiche verändern. Sie könnte beispielsweise in Zukunft die Dreh-



Schlechter als ein Kleinkind: An der Antwort auf die Frage, was passiert, wenn man einen Lichtschalter betätigt, scheitert künstliche Intelligenz heute noch. Ein Bild davon kann sie aber schon produzieren. (Befehle: „Einjähriges neugieriges Mädchen drückt einen modernen Lichtschalter. Im Lichtkegel des Schalters“, „wissenschaftlich“, „Kodak Portra Farben“, „Infografik“.)

75

bücher für Filme schreiben, Krankheitsdiagnosen erstellen oder Psychotherapien durchführen. Die Technik entwickelt sich rasant. In den USA können sich Menschen schon jetzt von Apps mit künstlicher Intelligenz helfen lassen, wenn sie sich deprimiert oder überfordert fühlen. Andere Apps üben mit Schülern Fremdsprachen oder beraten ihre Nutzer in technischen Dingen.

„Ich glaube, dass die künstliche Intelligenz eine große Chance ist. Sie kann Routineaufgaben übernehmen und unsere Arbeit effektiver machen“, sagt Schulz. „Aber wir müssen immer darüber informiert sein, dass wir es mit künstlicher Intelligenz zu tun haben.“ Denn es hat sich gezeigt, dass KI zumindest gelegentlich grob danebenliegt. Das reicht von banalen Fehlern – etwa als Googles System

Bard vor einigen Wochen darauf beharrte, dass wir noch im Jahr 2022 leben – bis zum kompletten Erfinden von Fakten, wie es Schulz ebenfalls erlebt hat. Er ließ sich beispielsweise von künstlicher Intelligenz ein Standardprinzip der Psychologie erklären, und das Programm absolvierte die Aufgabe mit Bravour. Als sich der Wissenschaftler jedoch die Literaturangaben ansah, die der Algorithmus

→

als Belege anführte, stellte er fest: Einige dieser Fachartikel existierten gar nicht. „Die künstliche Intelligenz hat sie einfach erfunden“, so Schulz – wie ein Student, der merkt, dass er Wissenslücken hat, und daraufhin anfängt zu fabulieren, um diese zu verbergen.

Gefährliche Ratschläge

Auch wenn ChatGPT sich auf persönliche Dialoge einlässt, geht das nicht immer gut. Einem Reporter der *New York Times* riet das Programm, sich von seiner Frau zu trennen. Noch bestürzender verlief ein Test, in dem GPT-3 medizinische Ratschläge geben sollte. Gegenüber einem fiktiven Patienten mit Selbstmordabsichten

äußerte sich das Programm zustimmend. Prinzipiell lassen sich solche Ausrutscher unterbinden, indem man die künstliche Intelligenz entsprechend anpasst. Um beispielsweise zu verhindern, dass Nutzerinnen und Nutzer Informationen zur Produktion gefährlicher Chemikalien oder zum illegalen Erwerb von Schusswaffen erhalten, sperrte der Entwickler von GPT-4 solche Anfragen.

Die weitere Entwicklung künstlicher Intelligenz zu unterbrechen, weil sie Arbeitsplätze vernichten und Fehlinformationen verbreiten könnte – wie dies KI-Spezialisten im Frühling in einem Memorandum forderten –, hält Schulz jedoch für „Panikmache“. Viel bedenklicher findet er, dass die Unternehmen mit verdeckten Karten spielen. „OpenAI etwa hat nicht veröffentlicht, wie groß GPT-4 ist und welche

Menge an Daten oder welche speziellen Trainingstechniken zum Einsatz kamen“, moniert Schulz. Forschende können so kaum überprüfen, wie die Algorithmen mit Menschen kommunizieren. „Ohne Einsicht in die Daten und Trainingsprotokolle bleiben die Systeme eine Blackbox“, so der Forscher – und das bei einem Programm, bei dem unklar ist, warum es manchmal überraschend emotional reagiert, in anderen Fällen aber so rational, wie man es von einer Software erwartet. Wenn Schulz GPT etwa in Versuche einbindet, in denen mehrere Probanden kooperieren müssen, handelt es egoistisch und maximiert den eigenen Vorteil. „Die Kontrolle über das Verhalten künstlicher Intelligenz liegt bei einer Handvoll Firmen, und wir können nur hoffen, dass sie verantwortlich handeln“, sagt Eric Schulz. „Das ist das eigentliche Problem.“

←

76

Bild, das die Software Midjourney zum „Linda-Problem“ kreierte hat, einem Standardtest der Kognitionspsychologie (Befehle: „30-jährige feministische schwarze Frau, die in grauer Geschäftskleidung für die Rechte der Frauen demonstriert, hält ein Plakat in die Höhe“, „Lächelnd führt sie in der Halle einer modernen Bank eine Demonstration an“, „Kodak Portra“.)



BILD: KI BILD MIDJOURNEY | ERSTELLT VON GESINE BORN | BILDERINSTITUT

FORSCHUNG LEICHT GEMACHT

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

www.mpg.de/mpf-mobil

www.mpg.de/mpforschung

KOSTENLOS
DOWNLOADEN!





Einladung zum Einbruch: Der Kriminologe Patrick McClanahan stiftet Gefängnisinsassen dazu an, virtuelle Häuser auszuplündern. Dieser Straßenzug entstand mithilfe moderner Virtual-Reality-Technik.

78

Max-Planck-Forschende kooperieren mit Partnern in mehr als 120 Ländern. Hier schreiben sie über ihre persönlichen Erfahrungen und Eindrücke. Patrick McClanahan vom Freiburger Max-Planck-Institut zur Erforschung von Kriminalität, Sicherheit und Recht ist für sieben Monate nach Pennsylvania gereist. In vier Gefängnissen hat er verurteilte Einbrecher getroffen und sie dazu animiert, im Dienst der Wissenschaft Häuser auszurauben.

Als Kind war ich wohl Serienjunkie. Die Krimiserien der frühen 2000er-Jahre habe ich geliebt! Wir hatten damals einen Familienhund, der Jethro hieß, nach der Hauptfigur von *Navy CIS*. Unglücklicherweise hat mein Fernsehkonsum in so jungen Jahren dazu geführt, dass ich eine Phobie entwickelte. Ich konnte nicht mehr einschla-

fen vor lauter Angst, umgebracht zu werden. Mit der Unterstützung eines Therapeuten habe ich meine Ängste in den Griff bekommen. Geblieben ist der Drang, Verbrecher und ihre Motive verstehen zu wollen. Ich habe mich daher entschlossen, Psychologie und Strafrecht zu studieren und Kriminologie zu werden.

Als Postdoc arbeite ich derzeit am Projekt „Virtual Burglary“ mit. Neben dem Freiburger Max-Planck-Institut und der University of Portsmouth sind daran die Leiden University und die Vrije Universiteit Amsterdam beteiligt. In dem groß angelegten Forschungsprogramm geht es darum, die unterschiedlichen Vorgehensweisen von Einbrechern zu erfassen. Ziel ist es, bessere Präventionsmaßnahmen zu entwickeln und Kriminalität zu verhindern. Meine Studienteilnehmer waren inhaftierte Einbrecher in vier verschiedenen Gefängnissen im US-Bundesstaat Pennsylvania.

Für meine Studie habe ich täglich sieben bis neun Stunden im Gefängnis ver-

bracht. Davon entfielen allein zwei Stunden auf Tätigkeiten, die mit Sicherheit oder Administration zu tun hatten. Vor meiner Ankunft musste ich der Gefängnisverwaltung eine Liste schicken mit allem, was ich für meine Arbeit brauchte und mitbringen wollte. Daran musste ich mich penibel halten. Am Eingang zur Strafanstalt passiert man eine Sicherheitskontrolle, ähnlich wie am Flughafen. Ich wurde durchsucht, und alle Gegenstände, die ich bei mir trug, wurden einzeln geprüft. Innerhalb des Gebäudes durfte ich mich nicht frei bewegen, sondern wurde immer von Sicherheitspersonal begleitet.

Die Verwaltung hatte mir vorab die Namen aller Gefängnisinsassen gegeben, die als Probanden infrage kamen. Mit den meisten habe ich einzeln gesprochen und ihnen das Projekt vorgestellt. Bei solch einem Gespräch sind die ersten dreißig Sekunden entscheidend, um Vertrauen aufzubauen und jemanden für die Studie zu gewinnen. Anfangs habe ich mich danach erkundigt, wie der Tag so läuft. Schon so



PENNSYLVANIA, USA

eine einfache Frage entpuppt sich oft als Türöffner, weil sich sonst kaum jemand dafür interessiert. Viele ließen sich dadurch überzeugen, dass sie mit ihrer Teilnahme einen wichtigen Beitrag leisten, um die Welt sicherer zu machen – denn davon profitieren ja ihre Familien. Entscheidend war sicherlich auch, dass ich unabhängiger Wissenschaftler bin und noch nie für die Polizei oder die Justiz tätig war. Ungefähr 40 Prozent der Befragten waren bereit mitzumachen. Insgesamt haben 160 Personen aus Pennsylvania teilgenommen.

Die Studienteilnehmer hatten die Aufgabe, einen Einbruch zu begehen – rein virtuell natürlich. Eine Virtual-Reality-Brille ermöglichte es, ein imaginäres Wohnviertel auszukundschaften und bestimmte Häuser zu bewerten, genauso wie in der Realität. Das Virtual-Reality-System zeichnete alle Handlungen in Echtzeit auf. So konnte ich verfolgen, wie die Einbrecher ihr Ziel auswählten und was dabei für sie wichtig war. Indem ich etwa Straßenbeleuchtung, Alarmsys-

teme oder auch die Position geparkter Autos veränderte, konnte ich testen, welchen Einfluss das jeweils auf die Entscheidungen und das weitere Vorgehen der Einbrecher hatte. Für mich war es wichtig, dass sowohl Amateure als auch Profi-Einbrecher teilnahmen – denn beide Gruppen arbeiten sehr unterschiedlich.

Nur wenige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die auf dem Gebiet der Kriminologie forschen, gehen in Gefängnisse und arbeiten mit Straftälligen. Für meine Forschung und für mich persönlich ist das jedoch essenziell. Schlechte Erfahrungen habe ich dabei bisher nicht gemacht. Es ist allerdings schwierig für mich, mit den teilweise schockierenden persönlichen Geschichten umzugehen, die mir die Häftlinge erzählen und auf die ich in meiner Rolle als Wissenschaftler nicht reagieren darf. Nach meiner Zeit am Max-Planck-Institut möchte ich mich auf eine Professur in den USA bewerben. Auf alle Fälle will ich auch in Zukunft Gefängnisinsassen in meine Forschung einbeziehen.

FOTO: MPI ZUR ERFORSCHUNG VON KRIMINALITÄT, SICHERHEIT UND RECHT



Patrick McClanahan

30, ist Amerikaner und hat am Roanoke College in Virginia Psychologie und Strafrecht studiert. Nach seiner Promotion an der University of Cambridge übernahm er 2021 eine Postdoc-Stelle am Freiburger Max-Planck-Institut zur Erforschung von Kriminalität, Sicherheit und Recht. Im Rahmen des Projekts „Virtual Burglary“ unter der Leitung von Direktor Jean-Louis van Gelder nutzt er Virtual-Reality-Technik, um das Verhalten von Straftätern zu studieren.



ZEITREISE DURCH DAS ALL

Stellare Gasnebel, kosmische Netze und galaktische Feueräder – die vielen Bilder in dem großformatigen Buch sind beeindruckend. Wer es dennoch irgendwann schafft, aus dem Staunen herauszukommen und sich in den Text zu vertiefen, der wird nicht enttäuscht: Das neueste Buch von Felicitas Mokler ist nicht nur ein optischer Genuss, sondern auch ein Gewinn für alle, die an Geburt, Entwicklung und Tod – kurz: an der Evolution – des Universums interessiert sind. In neun Kapiteln beschreibt die arrivierte Wissenschaftsjournalistin, wie die Kosmologie sich im Laufe der

vergangenen hundert Jahre entfaltet hat und was wir heute über das Weltall wissen. Da geht es natürlich um den Urknall vor knapp 14 Milliarden Jahren, aber auch um die Problematik dieser Theorie. Denn die Rezepte für Sterne, Galaxien und Planeten sowie für die Expansion des Kosmos lassen sich ohne Zutaten wie Dunkle Materie und Dunkle Energie nicht verstehen. Doch die beiden Letzteren hat man noch nicht dingfest gemacht. Dazu kommt der „Trouble mit Hubble“: Der Wert für die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Weltalls, die „Hubble-Konstante“, variiert je nach

angewandter Messmethode. Ist etwas nicht in Ordnung mit den kosmischen Standardmodellen? Die Autorin stellt das derzeit heiß diskutierte Thema ausführlich dar und beweist damit, dass sie am Puls der aktuellen Forschung ist. Dies gilt für das gesamte Buch, welches den Markt astronomischer Sachliteratur bereichert.

Helmut Hornung

Felicitas Mokler
Die Evolution des Universums
 224 Seiten, Franckh-Kosmos
 34,00 Euro

80

SCHÖNE NEUE WELT

In der Klimadebatte stehen sich derzeit zwei Standpunkte unversöhnlicher denn je gegenüber: Klimaschutz durch Verzicht oder durch Innovation. Tara Shirvani setzt eindeutig auf Letzteres. Unter Innovation versteht sie dabei vor allem eines: synthetische Biologie. Genetisch veränderte Bakterien, Pflanzen und Tiere sollen altbewährte oder neue Materialien CO₂-neutral produzieren. Getreu dem Untertitel *Wie wir das Klima retten, den Müll aus dem Meer holen und den ganzen Rest auch noch glänzend hinbekommen* strotzt Shirvanis Buch vor Optimismus und Aufbruchsstimmung. Da gibt es kein Problem, für welches die synthetische Biologie nicht eine Lösung parat hätte. Steigende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre? Schnell wachsende Turbobäume holen das Treibhausgas wieder raus! Inseln aus Plastikmüll in den Ozeanen? Genetisch veränderte Mikroben fressen sie einfach auf! Und selbst mittels synthetischer Biologie wieder zum Leben erweckte Mammuts sollen zukünftig für den Klimaschutz eingesetzt werden. Das Buch will Lust auf die Zukunft verbreiten, kein Wort von Einschränkungen oder Verzicht. In

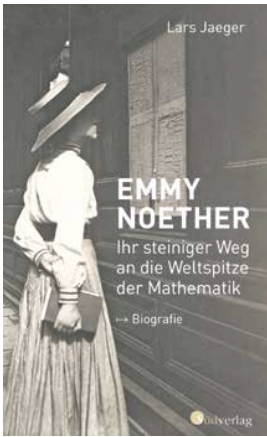
dieser Zukunft wird man sogar wieder ohne schlechtes Gewissen fliegen können. Mit synthetischer Biologie machen Klimaschutz und Kreislaufwirtschaft Spaß. Schade nur, dass der Autorin vor lauter Euphorie immer wieder missverständliche Formulierungen unterlaufen. Überhaupt bleibt es unklar, woher ihre Behauptungen stammen, denn Quellenangaben gibt es nicht in ihrem Buch. Unerwähnt bleibt auch, dass bislang jede neue Technik auch neue Probleme mit sich brachte. Sollte Tara Shirvanis Vision tatsächlich Wirklichkeit werden, darf man wohl schon auf den Nachfolgebund gespannt sein: „Wie wir die Welt vor den Plastikfressern retten, die Turbobäume aus dem Wald holen und den ganzen Rest auch noch glänzend hinbekommen“.

Harald Rösch

Tara Shirvani
Plastikfresser und Turbobäume
 208 Seiten, edition a
 25,00 Euro



NEU ERSCHIENEN



PIONIERIN DER ALGEBRA

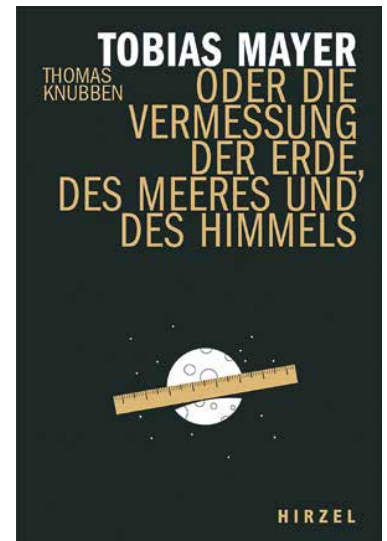
Eine Frau, die ernsthaft Wissenschaft betreibt und an der Universität Vorlesungen hält? Und das in der Mathematik? Anfang des 20. Jahrhunderts ist das für viele Professoren undenkbar: Das weibliche Gehirn halte er „für ungeeignet zur mathematischen Produktion“, schrieb damals ein bekannter Mathematiker. Als die 33-jährige Amalie Emmy Noether im Jahr 1915 an der Universität Göttingen einen Antrag auf Habilitation in ebendiesem Fach stellt, wird ihr Gesuch daher abgelehnt. Trotz brillanter wissenschaftlicher Arbeiten schafft sie es erst im dritten Anlauf, diese Hürde auf dem Weg zur Professur zu nehmen. Doch lässt sich Emmy Noether von äußeren Widerständen niemals beirren. Entgegen allen Hemmnissen und gesellschaftlichen Konventionen geht sie ihren Weg und widmet sich ganz ihrer Leidenschaft: der abstrakten Algebra. Dass die öffentliche Anerkennung ihrer Leistungen ihr weitgehend versagt bleibt, hält sie ebenso wenig davon ab wie die Tatsache, dass man sie für ihre Tätigkeiten an der Universität jahrelang nicht bezahlt. Im Jahr 1933 wird ihr als Jüdin schließlich die Lehrbefugnis entzogen. Sie emigriert in die USA, wo sie zwei Jahre später stirbt.

Lars Jaeger, Physiker und Wissenschaftsautor, zeichnet ein lebendiges Porträt dieser außergewöhnlichen Frau, die mit ihren bahnbrechenden Arbeiten Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie untermauert und das mathematische Denken revolutioniert hat.

Lars Jaeger
Emmy Noether
256 Seiten, Süderverlag
22,00 Euro

MIT INNEREM KOMPASS

Im 17. Jahrhundert begann der Handel zwischen den Kontinenten zu florieren. Doch nicht alle Schiffe erreichten ihr Ziel: Viele zerschellten an Felsen, welche die Seeleute an jenen Stellen nicht vermutet hatten. Thomas Knubben erzählt die Geschichte des Mathematikers, Kartografen und Astronomen Tobias Mayer, der seine präzisen Mondtabellen für die Schiffsnavigation nutzbar machte. Diese erlaubten auf See eine einfache Bestimmung der Längengrade und damit der eigenen Position – Mayer verhalf so etwa James Cook zu sicheren Fahrten. Das Buch vermittelt ein faktenreiches Bild einer Zeit, in der sich renommierte Universitäten zunehmend von der Kirche abwandten und auf evidenzbasierte Wissenschaft setzten. Tobias Mayer war Autodidakt, und doch begleitete er die Zeit der Aufklärung als populärer Professor an berühmten Universitäten. Was war sein Erfolgsrezept? Auch wenn über das Privatleben des Wunderkindes und Generalisten recht wenig bekannt ist, zeichnet der Historiker, Germanist und Kulturwissenschaftler Knubben das authentische Bild eines jungen Menschen, der aus einfachen Verhältnissen



stammte und ohne exzellente Schulbildung zu einem der gefragtesten Kartografen seiner Zeit wurde. Neugier, Mut und Visionen wiesen ihm wie ein Kompass den Weg. Mayers Leben war das eines überzeugten Quereinsteigers, der seiner Begeisterung folgte – und der Verbindungen zwischen Disziplinen zu erkennen vermochte, die andere nicht sahen. Jules Verne und ein Mondkrater erinnern noch heute an den Wissenschaftsstar.

Tobias Beuchert

Thomas Knubben
Tobias Mayer oder Die Vermessung der Erde, des Meeres und des Himmels
211 Seiten, S. Hirzel Verlag
24,00 Euro



FÜNF FRAGEN

ZU DEN KOSTEN DES KLIMAWANDELS

AN TOBIAS GRIMM

Als Rückversicherer übernimmt Munich Re Spitzenrisiken für ihre Kunden, die Erstversicherer. Überschwemmungen, Stürme oder Hitze-wellen verursachen Schäden, die eine Elementarschadenversicherung allein nicht ausgleichen kann. Es gehört zum Kerngeschäft von Munich Re, die Folgen des Klimawandels zu verstehen und gegenzusteuern.

Lassen sich Naturkatastrophen vermehrt auf den Klimawandel zurückführen?

TOBIAS GRIMM Mit pauschalen Aussagen wäre ich vorsichtig. Unser Job ist es, Extremwetterereignisse zu versichern. Ob diese im Einzelfall auf den Klimawandel zurückgehen, ist schwer zu beweisen. Mit dieser Frage befasst sich die „Attributionsforschung“, es gibt hier jedoch auch Unsicherheiten: Danach habe die Wahrscheinlichkeit für Extremniederschläge wie im Ahrtal im Jahr 2021 um das 1,2- bis 9-Fache zugenommen. Wo wir uns sicher sind: Wir erfassen mehr Naturkatastrophen und höhere Schäden in den letzten Jahren. Weltweit betrug die volkswirtschaftlichen Schäden vergangenes Jahr 270 Milliarden US-Dollar, wovon 120 Milliarden US-Dollar versichert waren. In den letzten sechs Jahren wurde weltweit dreimal die Schadengrenze von 100 Milliarden US-Dollar überschritten.

Woher kommt diese krasse Kostensteigerung?

Die versicherten Werte steigen, und es wird mehr gebaut. Wo einst eine kleine Siedlung

war, steht heute eine Stadt. Die Katastrophe im Ahrtal war mit einem volkswirtschaftlichen Schaden von rund 40 Milliarden US-Dollar etwa viermal so teuer wie die bisher teuerste Hochwasserkatastrophe in Mitteleuropa und deutlich teurer als die Überschwemmungen dieses Frühjahrs in Italien. Allerdings lässt sich die Schadenentwicklung nicht allein durch die Wertsteigerung erklären. Vieles spricht dafür, dass auch der Klimawandel eine zunehmende Rolle bei wetterbedingten Naturkatastrophen spielt.

Kann man die Wertsteigerung herausrechnen und den reinen Effekt des Klimawandels ermitteln?

Das Rausrechnen ist in der Praxis kaum umsetzbar. Der Klimawandel wirkt sich regional unterschiedlich auf die Naturgefahren aus. Auch die mitunter sehr unterschiedliche Effektivität von Anpassungsmaßnahmen müssten in dieser Rechnung beachtet werden.

Der Ansatz von Munich Re ist es, nicht länger zu reagieren, sondern den Wandel aktiv zu begleiten. Wie geht das in Bezug auf die Klimakrise? Der Weltklimabericht spricht ja eine eindeutige Sprache.

Im Geschäft der Rückversicherung passen wir unser Risikomanagement jährlich an und berücksichtigen dabei die Prognosen der Klimamodelle. Langfristig braucht es aber beides: Vermeidung und Anpassung. Wir müssen Risiken minimieren, und dazu gehört es, weitere Treibhausgasemissionen zu vermeiden. Außerdem verhelfen wir er-

neuerbaren Energien zum Durchbruch, indem wir sie versichern und Ausfallrisiken übernehmen. Wir setzen Anreize, auch für unsere Kunden, und wollen bis 2050 selbst klimaneutral wirtschaften.

Wie viel wird eine ausreichende Versorgung mit erneuerbaren Energien kosten? Dem gegenüber stehen die Kosten durch direkte Klimaschäden, die laut Bundesministerium für Klimaschutz je nach Erwärmung bis 2050 ganze 280 bis 900 Milliarden Euro betragen könnten.

Eine solche Gegenüberstellung ist schwierig und kann sehr leicht fehlinterpretiert werden. Laut der International Energy Agency bräuchte es bis 2030 jährlich 1,6 Billionen US-Dollar an Investitionen in erneuerbare Energien, um die 1,5-Grad-Marke nicht zu überschreiten. Momentan liegen die Investitionen bei einem Drittel davon. Das sind globale Zahlen, wohingegen die genannten Schadenssummen für Deutschland gelten und auch Folgeschäden sowie immaterielle Schäden beinhalten. Der Umbau in eine kohlenstofffreie Wirtschaft ist alternativlos, muss aber auch gesellschaftlich akzeptiert werden und schnell genug gehen. Gleichzeitig müssen wir uns an die Veränderungen durch den Klimawandel anpassen, die bereits heute spürbar sind.

Interview: Tobias Beuchert

Tobias Grimm leitet die Einheit Climate Advisory und NatCat Data bei der Münchener Rückversicherung (Munich Re).

- 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)
Mechthild Zimmermann (Kultur, Gesellschaft; -1720)

Redaktion

Dr. Tobias Beuchert (Astronomie, Physik, Technik; -1404)
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

Max Planck Forschung berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den Max-Planck-Instituten und richtet sich an ein breites wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemein verständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (*Max Planck Research*) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr. Die Auflage dieser Ausgabe beträgt 78 000 Exemplare (*Max Planck Research*: 10 000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in *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 24 000 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 7 000 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

