

Max Planck FORSCHUNG



Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft 2.2019

Energie

COMPUTERETHIK
Digitaler
Humanismus

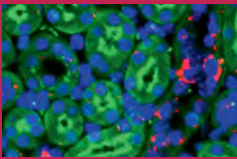
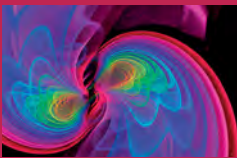
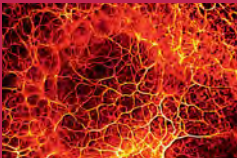
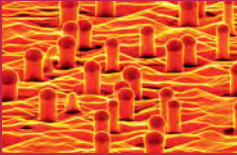
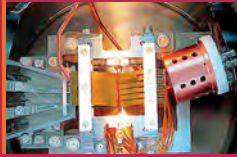
PFLANZENFORSCHUNG
Volle
Kanne!

MASCHINELLES LERNEN
Auf Fairness
programmiert

Spezial
Schwarze Löcher



Connecting Science and Business.



Als Technologietransfer-Organisation der Max-Planck-Gesellschaft ist Max-Planck-Innovation das Bindeglied zwischen Industrie und Grundlagenforschung. Mit unserem interdisziplinären Team beraten und unterstützen wir die Wissenschaftler bei der Bewertung von Erfindungen, der Anmeldung von Patenten sowie der Gründung von Unternehmen. Der Industrie bieten wir einen zentralen Zugang zu den Innovationen der Max-Planck-Institute. Damit erfüllen wir eine wichtige Aufgabe: Den Transfer von Ergebnissen der Grundlagenforschung in wirtschaftlich und gesellschaftlich nützliche Produkte.

Connecting Science and Business





Labor unter weißen Segeln

Wer die Eugen Seibold für eine ganz normale Jacht hält, täuscht sich gewaltig. Zwar unterscheidet sich das Boot in seinem klaren, eleganten Design auf den ersten Blick kaum von einer Luxusjacht, doch wer genauer hinschaut, dem fallen schnell einige markante Unterschiede auf. Das kurze Cockpit, ein großes Deckhaus, die hohe Reling, vor allem aber der große, offene Bereich achtern mit dem unübersehbaren A-Rahmen zum Hantieren mit großen und schweren Messgeräten – all das zeigt es ganz deutlich: Die Eugen Seibold ist ein Arbeitsschiff.

Mit einer Länge von 22 Metern, einem Gewicht von 44 Tonnen inklusive aller Einbauten und Geräte und einer vergleichsweise kleinen Segelfläche von knapp 300 Quadratmetern ist diese Jacht sicher kein „Performanceboot“ im sportlichen Sinne – im wissenschaftlichen dafür aber umso mehr! Alles an Bord ist auf Effizienz und Flexibilität ausgerichtet, mehr als die Hälfte des Innenbereichs wird von Laboren eingenommen. Auch auf hoher See kann das Schiff mit einer kleinen Crew von nur zwei bis drei Personen zuverlässig gesegelt werden. Messgeräte in Leichtbauweise und der mit einer Hydraulik schwenkbare A-Rahmen erleichtern das wissenschaftliche Arbeiten an Deck. So können umfangreiche Forschungsdatensätze zu vergleichsweise geringen Kosten erhoben werden, sowohl bei Langzeitbeobachtungen als auch bei kürzeren Ausfahrten.

Die Idee eines Forschungssegelschiffs hatte Gerald Haug vom Max-Planck-Institut für Chemie, realisieren konnte er sie mithilfe der Werner Siemens-Stiftung, die den Bau der Jacht finanziert hat. Haugs Forschungsziel ist das bessere Verständnis des biogeochemischen Kreislaufs der Ozeane – mit anderen Worten: das Zusammenspiel von Physik, Chemie und Biologie des Meeres mit der marinen Atmosphäre. Hierzu wollen Haug und sein Team an Bord der Segeljacht Luft und Wasser kontaminationsfrei beproben. Denn während bei Schiffen mit Metallrumpf und Dieselantrieb eine dauernde Verunreinigung des lokalen Umfelds unvermeidlich ist, kann der Forschungsbetrieb auf der Eugen Seibold dank eines Hybridantriebs und einer leistungsfähigen Hochvoltbatterie bis zu zehn Stunden auf den Dieselantrieb verzichten – trotz des nicht unwesentlichen Energieverbrauchs der vielen Hightechgeräte an Bord.



Inhalt



18 ENERGIE

18 Die Keimzelle der Biobatterie

Die Energieversorgung der Zukunft hat ein Speicherproblem. Um überschüssigen Strom von Windkraft- und Solaranlagen für Zeiten aufzuheben, in denen es zu wenig davon gibt, braucht man leistungsfähige Batterien und Kondensatoren, die aus möglichst ungiftigen und nachhaltigen Materialien bestehen sollten. Daran arbeiten Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung.

26 Funken in der Sternenmaschine

Das Sonnenfeuer auf die Erde holen – das ist ein alter Menschheitstraum. In der Tat wäre die Kernfusion im irdischen Reaktor eine völlig neue Energiequelle. Einen Weg zu dieser Form der Energieerzeugung verfolgen Forscher am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik mit der Anlage Wendelstein 7-X.

34 Ein Klimagas befeuert die Chemie

Ausgerechnet CO₂ könnte der chemischen Industrie helfen, ihre Klimabilanz zu verbessern. Mit Energie aus erneuerbaren Quellen könnte es sich in Komponenten für Kunststoffe und andere Produkte einbauen lassen – wenn sich dafür geeignete Katalysatoren und Produktionsverfahren finden. Danach sucht ein Team am Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion.

ZUM TITEL Lichtblicke für die Energiewende: Regenerative Energiequellen sollen künftig Kohle, Gas und Erdöl ersetzen. Dabei könnte die Kernfusion eine Alternative zu Strom von Windrädern und Solaranlagen bieten. Die Leuchtspur eines Elektronenstrahls in einem Plasma zeigt, dass ein Magnetfeld dessen geladene Teilchen, die in einem Fusionskraftwerk verschmelzen und dabei große Menge Energie freisetzen würden, wie gewünscht einschließt. Während bei der Kernfusion noch grundlegende physikalische und technische Fragen offen sind, fehlen beim Ausbau von Wind- und Sonnenstrom bisher geeignete Energiespeicher. Batterien aus nachwachsenden Rohstoffen oder aus Kohlendioxid erzeugte Chemieprodukte könnten da helfen.

10 Gestalten: Wenn die Grenzen zwischen Mensch und Maschine verschwimmen, braucht es eine neue Ethik.

PERSPEKTIVEN

- 06 70 Jahre Wissenschaftsfreiheit
- 06 Leinen los!
- 07 „Viren können schnell eine gesamte Population verändern“
- 08 New York, Bristol, Tokio
- 08 Vorbildliche Weiterentwicklung
- 09 Ein Fluss unter menschlichem Einfluss
- 09 Ins Netz gegangen

ZUR SACHE

10 Digitaler Humanismus

Die Digitalisierung rückt dem Menschen im Alltag buchstäblich immer näher. Längst steht die Frage nach einer Ethik im Raum, die die künstliche Intelligenz in ihre Schranken weist. Unser Autor plädiert dafür, die Ideale des Humanismus für die digitale Welt wiederzubeleben.

FOKUS

- 18 Die Keimzelle der Biobatterie
- 26 Funken in der Sternenmaschine
- 34 Ein Klimagas befeuert die Chemie



<https://mpf2019.de/goto/Umfrage>



50 Gelungen: Das Event Horizon Telescope hat das erste Bild eines schwarzen Lochs geliefert.



60 Gefangen: Kannepflanzen aus Südostasien locken Fliegen an und machen dabei fette Beute.



74 Gemessen: Tanja Michalsky untersucht, was historische Landkarten und Stadtpläne erzählen.

SPEKTRUM

- 42** 3D-Filme aus der Zellmembran
- 42** Molekül vom Ursprung des Universums
- 43** Ernährung beeinflusste Entwicklung von Sprachen
- 43** Kluft zwischen Arm und Reich in der Lebenserwartung wächst
- 43** Auf der Spur der Denisovaner
- 44** Fehler im Erbgut ohne Folgen
- 44** Sind sich Fische ihrer selbst bewusst?
- 45** Lebensrettende Energiewende
- 45** 18 erdgroße Planeten auf einen Schlag
- 46** Affenjagd sicherte das Überleben im Regenwald
- 46** Insulin schützt vor Darmkrebs
- 47** Kamine in der Milchstraße
- 47** Soziale Unsicherheit stresst auch Schimpansen
- 48** Flughunde forsten afrikanische Wälder auf
- 48** Die Wurzeln der Apfelbäume
- 48** Ein Sprung Richtung Supraleitung bei Raumtemperatur

BIOLOGIE & MEDIZIN

- 60 Volle Kanne!**
Tellereisen, Leimruten, Fallgruben – insektenfressende Pflanzen haben sich ungewöhnliche Techniken einfallen lassen, um an zusätzliche Nährstoffe zu gelangen. Am Max-Planck-Institut für chemische Ökologie untersuchen Forscher, wie Kannepflanzen aus Südostasien ihre Opfer anlocken und verdauen.

MATERIAL & TECHNIK

- 68 Auf Fairness programmiert**
In Zukunft werden Computer immer häufiger über Menschen entscheiden – sei es bei der Kreditvergabe oder bei der Bewertung von Bewerbungen. Doch automatische Systeme diskriminieren immer wieder einmal einzelne Personengruppen. Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme wollen das ändern.

KULTUR & GESELLSCHAFT

- 74 Die Kunst der Orientierung**
Zur Person: Tanja Michalsky

RUBRIKEN

- 03 Orte der Forschung**
- 16 Post aus – der Antarktis**
Ein Paradies in Weiß und Blau
- 80 Rückblende**
Eine Formel, die Flügel verleiht
- 82 Neu erschienen**
- 82** Johannes Krause mit Thomas Trappe, Die Reise unserer Gene
- 83** Harald Meller, Kai Michel, Die Himmelscheibe von Nebra
- 84** Matthias Eckoldt, Leonardos Erbe
- 85** Ulli Kulke, '69
- 86** Thorsten Dambeck, Das Apollo-Projekt
- 86** James Donovan, Apollo 11
- 87 Standorte**
- 87 Impressum**

Schwarze Löcher

- 50 Überblick**
Ein schwarzes Loch im Porträt
- 55 Interview**
„Eine verblüffende Übereinstimmung mit der Theorie“
- 57 Geschichte**
Das Geheimnis der dunklen Körper

SPEZIAL

70 Jahre Wissenschaftsfreiheit

Deutsche Forschungsinstitutionen starten Kampagne zum Grundgesetzjubiläum



Diskussionsbereit: Beim ZEIT-Forum im März debattierte Max-Planck-Präsident Martin Stratmann (Mitte) mit ZEIT-Redakteur Andreas Sentker, Nadia Al-Bagdadi von der Central European University, Anuscheh Farahat von der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und Ulrich Blumenthal vom Deutschlandfunk die Frage: Wissenschaftsfreiheit – eine Erfolgsgeschichte?

welche Bedeutung die Unabhängigkeit von Forschung und Lehre gerade für die Grundlagenforschung hat. Gleichzeitig setzt sie sich aber auch kritisch mit eigenen Entwicklungen auseinander und rückt mögliche Gefahren für die Wissenschaftsfreiheit in den Blick. Diskutiert wird unter anderem, was die Humangenomforschung im Zeitalter von CRISPR-Cas9 darf und welchen Regelungsbedarf es für autonome, selbstlernende Maschinensysteme gibt. Die Auftaktveranstaltung im März widmete sich der Frage, welche Verantwortung neue medizinische Behandlungsmethoden mit sich bringen.


Im Mai 2019 feiert Deutschland den 70. Geburtstag seines Grundgesetzes. „Wissenschaft, Forschung und Lehre sind frei“, heißt es darin in Artikel 5. Die deutsche Wissenschaft nimmt den Jahrestag zum Anlass, um über die Erfolgsgeschichte, die Chancen, aber auch die Gefährdungen dieser Freiheit zu debattieren und zu fragen, welche Verantwor-

tung daraus erwächst. Die Kampagne „Freiheit ist unser System. Gemeinsam für die Wissenschaft“ ist – angestoßen von der Max-Planck-Gesellschaft – eine Initiative der Allianz der zehn großen deutschen Wissenschaftsorganisationen. Eine Reihe von Veranstaltungen, Reden, Debatten und Meinungsbeiträgen betont im Laufe des Jahres 2019,

Leinen los!

Die MS Wissenschaft legt in 27 Städten in Deutschland und Österreich an

Seit Mitte Mai ist sie wieder auf großer Fahrt: die MS Wissenschaft, ein Frachtschiff mit Science Center an Bord. Nach der Eröffnung in Berlin fährt sie entlang schiffbarer Flüsse und Kanäle in 27 Städte. In der fast 600 Quadratmeter umfassenden Ausstellung geht es dieses Jahr um künstliche Intelligenz: Die Chancen maschinellen Lernens, die intelligente Auswertung großer Datenmengen und die Interaktion zwischen Mensch und Maschine sind dabei nur einige der vielen Facetten des Themas. Mehr als 30 interaktive Exponate laden zum Entdecken und Mitmachen ein, aber auch zum Nachdenken. Mit von der Partie sind dieses Mal drei Max-Planck-Institute – und das mit einem weiten Spektrum an Forschungsthemen. So verdeutlicht das Exponat „Der Körper denkt mit“ des Max-Planck-Instituts für Mathematik in den Naturwissenschaften, dass auch künstliche Intelligenz nicht unabhängig ist von Körper und Umgebung. Der Tauchroboter HyperDiver des Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie nutzt maschinelles Lernen, um die Artenvielfalt und den Gesundheitszustand von Korallenriffen zu bestimmen. Dass die Idee einer nicht menschlichen Form von Intelligenz schon seit Langem die menschliche Kreativität beflügelt, thematisiert das Exponat des Kunsthistorischen Instituts Florenz.

 <https://ms-wissenschaft.de>



Ausstellung an Bord: Unter dem Themenschwerpunkt „Künstliche Intelligenz“ tourt die MS Wissenschaft bis Anfang Oktober durch Deutschland. Mit dabei sind Exponate aus drei Max-Planck-Instituten.

„Viren können schnell eine gesamte Population verändern“

Guy Reeves zur Freisetzung genetisch veränderter Organismen in die Natur

Dank neuer Techniken wie der Genschere CRISPR/Cas9 und des sogenannten Gene Drive können Forscher das Erbgut sehr viel schneller verändern als früher und diese Veränderungen in kurzer Zeit selbst in großen Populationen verbreiten. Im Labor werden genetisch veränderte Organismen schon seit einiger Zeit erfolgreich eingesetzt, zum Beispiel in der Grundlagenforschung oder für die Produktion von Medikamenten. Nun sollen sie auch in die Natur entlassen werden. Guy Reeves vom Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön sieht vor allem die Freisetzung genetisch veränderter Viren mit Sorge.

Es gibt verschiedene Projekte, bei denen Wissenschaftler oder Unternehmen genetisch veränderte Organismen freisetzen möchten. Was halten Sie davon?

Guy Reeves: Was mich besonders besorgt, ist die Freisetzung infektiöser Viren, die gentechnisch verändert wurden, um das Immunsystem von Säugetieren zu verändern. Es sind bereits Viren dieser Art entwickelt worden, um Säugetiere immun gegen Krankheiten zu machen oder zu sterilisieren. Ein gentechnisch verändertes Virus, das sich in Wildkaninchenpopulationen ausbreitet, um sie gegen zwei Krankheiten immun zu machen, wurde im Jahr 2000 auf den spanischen Balearen getestet. In Australien ist ein weiteres Virus hergestellt worden, das Mäuse sterilisieren kann. Es wurde aber bislang nicht freigesetzt.

Ein weiteres Beispiel ist ein Forschungsprogramm der Forschungsagentur DARPA des US-Verteidigungsministeriums. Es setzt Insekten zur Übertragung gentechnisch veränderter Viren auf Mais- und Tomatensorten ein. Derzeit finden die Experimente noch in sicheren Gewächshäusern statt. Wenn solche Viren allerdings absichtlich in die Umwelt entlassen werden sollen, muss man das Vorgehen sehr sorgfältig prüfen. Obwohl diese Technologien schon weit gediehen sind, stehen wir bei ihrer Prüfung immer noch ganz am Anfang.

Warum sind Viren denn so problematisch?

Kaum ein anderes biologisches System kann sich so schnell auf eine komplette Population auswirken – nämlich schon inner-

halb einer einzigen Generation. Im Vergleich dazu ist der zurzeit viel diskutierte Gene Drive eine Schnecke. Hinzu kommt, dass das Wirtsspektrum eines Virus sehr breit sein kann. Es lässt sich also mitunter nur schwer vorhersagen, welche Arten ein Virus infizieren kann.

Lehnen Sie die Freisetzung genetisch veränderter Organismen in jedem Fall ab, wenn es sich nicht um landwirtschaftliche Nutzpflanzen handelt?

Nein, überhaupt nicht. Es geht nicht darum, neue Technologien zu verhindern. Wir müssen jedoch vorsichtig sein und den potenziellen Nutzen gegen die Risiken abwägen. Deshalb sollte besonders die Freisetzung infektiöser genetisch veränderter Organismen nur nach sorgfältiger Prüfung erfolgen. Zudem halte ich es in den meisten Fällen nicht für sinnvoll, Viren mit schwer kontrollierbaren Risiken einzusetzen, wenn es alternative Techniken gibt, mit denen man die gleichen Ziele erreichen kann. So kann man die Anzahl der Malariainfektionen auch mithilfe von Moskitonetzen und durch bessere Lebensbedingungen für die Menschen senken.

Ein Gen für Unfruchtbarkeit soll Moskitos ausrotten und dadurch die Übertragung von Malaria stoppen. Wie soll das denn funktionieren?

Ein solches Gen bewirkt, dass eine weibliche Mücke unfruchtbare Töchter hervorbringt. Ihre Söhne sind dagegen zeugungsfähig und verbreiten das Gen in der Population weiter. Das funktioniert aber nur, wenn die Mutter zwei mutierte Kopien des Unfruchtbarkeitsgens besitzt. Dann hat sie tatsächlich nur halb so viele Nachkommen, und die Mückenpopulation wird kleiner. Allerdings würde es lange dauern, bis die oft riesigen Mückenpopulationen auf diese Weise aussterben. Schließlich müssen ja immer zwei Kopien des Unfruchtbarkeitsgens in einer Mücke aufeinandertreffen, damit diese tatsächlich unfruchtbar wird.

Ein Phänomen namens Gene Drive könnte diesen Prozess beschleunigen.

Genau. Der Gene-Drive-Mechanismus sorgt dafür, dass alle Nachkommen einer Moskitomutter zwei mutierte Versionen



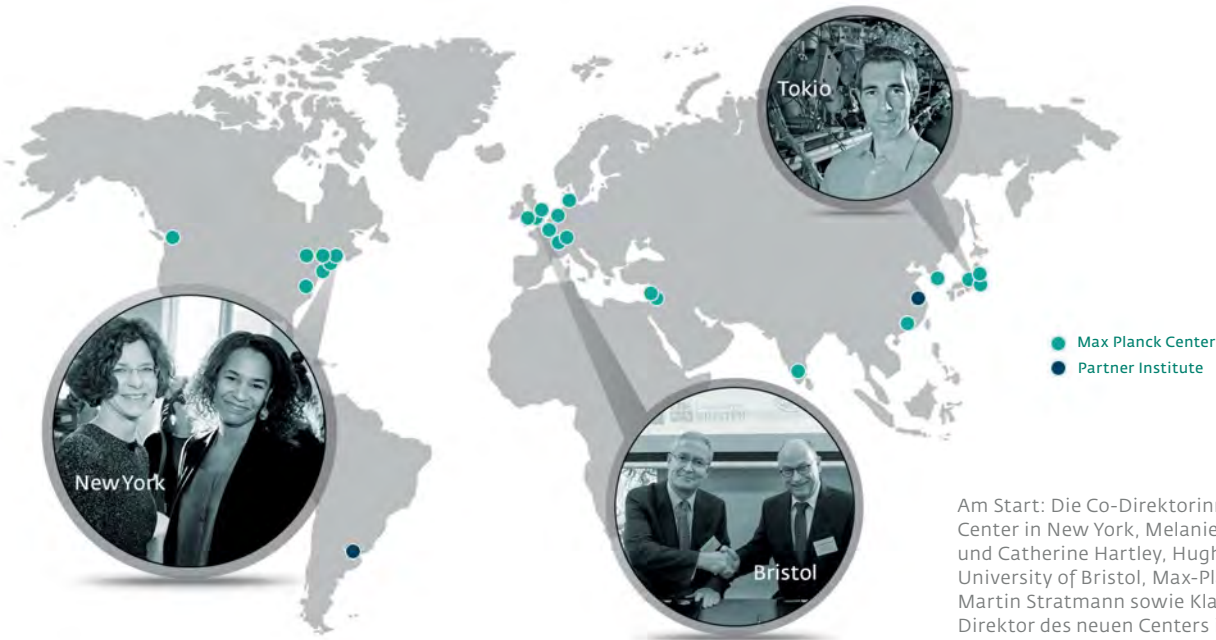
Guy Reeves

des Unfruchtbarkeitsgens erhalten, auch wenn diese nur eine Kopie davon besitzt. Dadurch würde die Population viel schneller als normal schrumpfen. Allerdings ist Gene Drive gar nicht so schnell, wie viele Menschen glauben. Selbst bei einem Tier mit einer so kurzen Generationszeit wie einer Mücke würde es unter idealen Bedingungen möglicherweise acht Jahre oder länger dauern, bis eine Population durch Gene Drive fortpflanzungsunfähig werden würde. Außerdem haben wir durch unsere Erfahrungen mit Insektenvernichtungsmitteln gelernt, wie schnell sich Insekten anpassen können, wenn der Selektionsdruck nur hoch genug ist. Und eine Resistenz gegen ein Unfruchtbarkeitsgen wäre für sie wie ein Sechser im Lotto. Ich bin sicher, dass sich große Insektenpopulationen an solch einen Gene Drive anpassen und ihn ausschalten werden. Die Moskitos werden sich auf diese Weise sehr wahrscheinlich nicht ausrotten lassen.

Reichen die derzeitigen Gesetze aus, mit denen solche Versuche geregelt sind?

Die Herausforderung, vor der die Regulierungsbehörden stehen, ist gewaltig. Sie müssen ungeheuer komplexe mathematische Modelle berücksichtigen – eine Aufgabe, die schon für gut ausgestattete Behörden in Industriestaaten schwer zu bewältigen ist. Viele der angedachten Projekte werden aber Schwellenländer betreffen, die dafür überhaupt nicht gerüstet sind. Und natürlich halten sich Viren und Insekten nicht an Ländergrenzen.

Interview: Harald Rösch



Am Start: Die Co-Direktorinnen des Max Planck Center in New York, Melanie Wald-Fuhrmann und Catherine Hartley, Hugh Brady, Präsident University of Bristol, Max-Planck-Präsident Martin Stratmann sowie Klaus Blaum, Co-Direktor des neuen Centers in Tokio (von links).

New York, Bristol, Tokio

Drei neue Max Planck Center auf drei Kontinenten gegründet

Die Max-Planck-Gesellschaft hat die Zusammenarbeit mit erstklassigen internationalen Partnern weiter ausgebaut und im Frühjahr 2019 drei neue Max Planck Center eröffnet. Den Auftakt machte das Max Planck-NYU Center for Language, Music and Emotion in New York. Es verbindet die traditionell eigenständigen Forschungsbereiche Sprache und Musik auf der einen

sowie Emotion, Erinnerung und Entscheidungsfindung auf der anderen Seite. Die Wissenschaftler planen, Schnittstellen zwischen diesen Bereichen experimentell zu erforschen. Im Max Planck-Bristol Center for Minimal Biology wollen Forscher künstliche Zellskelette aufbauen und molekulare Maschinen im Nanomaßstab entwickeln. Davon erwarten sie genauere Erkennt-

nisse über die notwendigen Bausteine des Lebens. Um noch kleinere Dimensionen geht es am Max Planck-RIKEN-PTB Center for Time, Constants and Fundamental Symmetries. Dort kooperieren mit den Max-Planck-Instituten für Kernphysik und für Quantenoptik, dem japanischen Forschungsinstitut RIKEN und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt insgesamt vier Partner. Ein Ziel ist, Uhren zu entwickeln, die noch genauer gehen als heutige Atomuhren, um Naturkonstanten genauer zu bestimmen und die Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie zu untersuchen.

Vorbildliche Weiterentwicklung

Bundespreis für Göttinger Verfahren zur hochparallelen Wirkstoffprüfung

Die Entwicklung neuer Medikamente ist sehr langwierig und teuer. Ist eine neue Substanz entdeckt, muss man für eine große Zahl von Molekülen – sogenannte Targets – in den Zellen bestimmen, wie diese auf die Substanz reagieren. Nur so ist es möglich, die gewünschte medizinische Wirkung zu belegen und Nebenwirkungen zu erkennen. Am Max-Planck-Institut für experimentelle Medizin in Göttingen wurde dafür erstmals ein integriertes Messverfahren entwickelt, das Substanzen in einer einzigen Messung parallel auf eine Vielzahl von Targets untersuchen kann. Damit lassen sich Medikamente im Vergleich zu den bestehenden Verfahren erheblich schneller und kostengünstiger entwickeln. Das Göttinger Forschungsteam um Projektleiter Moritz Rossner hat das Verfahren für die Anwendung in der pharmazeutischen

Erfolgreich im Technologietransfer: Moritz Rossner vom Max-Planck-Institut für Experimentelle Medizin.

Industrie weiterentwickelt und schließlich auch die Firma Systasy Bioscience gegründet. Dafür gewannen die Wissenschaftler nun den dritten Platz beim Innovationspreis VIP+ des Bundesforschungsministeriums. Die Auszeichnung prämiiert besonders erfolgreiche Projekte, die vom Ministerium im Rahmen des sogenannten VIP-Programms zur Validierungsförderung unterstützt wurden.



Fotos: Kahn/Courtesy of NYU Photo Bureau; Kate Kirkby; CSI; privat (unten)

Ein Fluss unter menschlichem Einfluss

Am Beispiel des Mississippi zeigt ein interdisziplinäres Projekt, wie wir die Natur dauerhaft verändern

Lässt sich der Übergang in ein neues, vom Menschen dominiertes Erdzeitalter auch auf regionaler Ebene anschaulich machen? Das Projekt „Mississippi. An Anthropocene River“ hat sich genau das zum Ziel gesetzt. Konzipiert wird es vom Haus der Kulturen der Welt und dem Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte; beteiligt sind zudem zahlreiche US-

amerikanische Partner sowie die Max-Planck-Institute für Chemie, für Biogeochemie und für Menschheitsgeschichte. Im Rahmen des laufenden Deutschlandjahres in den USA wird das Vorhaben unter anderem vom Auswärtigen Amt gefördert. Die Gebiete am Mississippi – einst weniger Fluss als immenses Überschwemmungsgebiet – haben sich im Zuge der Eindämmung und Schiffbarmachung im 20. Jahrhundert zu einem gewaltigen Landwirtschafts- und Industriekorridor entwickelt. Der Strom passiert komplexe, sich rapide wandelnde menschengemachte Ökosysteme, er ist Einzugsgebiet verschiedener Kulturen und Schauplatz historisch gewachsener Ungleichheiten. Im Rahmen des Mississippi-Projekts entwickeln Wissenschaftler, Künstler und Aktivisten gemeinsam neue Methoden für Forschung und Bildung über die Grenzen der Disziplinen hinweg. Zusammen mit Initiativen vor Ort vermitteln sie Einblicke in die lokalen Dynamiken globaler Veränderungen.



Wechselvoll: Das Motiv des Mississippi-Projekts basiert auf einer Karte aus den 1940er-Jahren, die historische Veränderungen im Flussbett dokumentiert.

Ins Netz gegangen



Macht der Gefühle

Hass und Liebe, Ekel und Geborgenheit – Gefühle bewegen und steuern uns. Welchen starken Einfluss sie auch auf Politik und Gesellschaft nehmen, zeigt die Ausstellung „Die Macht der Gefühle. Deutschland 19 | 19“. Entwickelt hat sie Ute Frevert, Direktorin am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, gemeinsam mit ihrer Tochter Bettina Frevert, die in der historisch-politischen Bildung arbeitet. Die 22 Poster im DIN-A1-Format sind für Schulen, Rathäuser, Bibliotheken und andere öffentliche Orte gedacht. Anhand einzelner Emotionen thematisieren sie wichtige Ereignisse der deutschen Geschichte von der Gründung der Weimarer Republik 1919 bis zur Friedlichen Revolution 1989. Die Webseite bietet unter anderem die Möglichkeit, das Set zu bestellen, und eine Übersicht, wo die Ausstellung aktuell zu sehen ist. <https://machtdergefuehle.de>

Ethnologische Forschung in drei Minuten

Wie sieht Feldforschung aus? Mit welchen Methoden arbeiten Sie? Im Video geben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für ethnologische Forschung in Halle Einblicke in ihre Arbeit. So spricht Imad Alsoos über Mobilisierungsstrategien islamischer Gruppen in Palästina und Tunesien, Charlotte Bruckermann stellt ihre Feldforschung zum CO₂-Emissionshandel in China vor, und Brian Campbell skizziert das Alltagsleben in der multi-religiösen Stadt Ceuta, einer spanischen Enklave in Marokko. Das Charmante an diesen dreiminütigen Videos: Sie liegen nicht nur in Englisch vor, sondern jeweils auch in der Muttersprache der Forschenden: in Arabisch, Deutsch und Maltesisch. www.eth.mpg.de/4807472

Pflanzen bestimmen per Smartphone

Beim Wandern entdecken Sie eine Pflanze, über die Sie gern mehr erfahren würden. Wie heißt die Pflanze, ist sie giftig, oder steht sie womöglich unter Naturschutz? Wenn Sie kein Bestimmungsbuch dabei haben, kann Ihnen künftig Ihr Handy helfen, und zwar mit der App *Flora incognita*. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena haben die Bestimmungsoftware mitentwickelt. Mit der Kamera des Smartphones lassen sich Blüten und Blätter fotografieren. Und in Sekundenschnelle erhalten Sie einen Vorschlag zum Namen der Pflanze sowie weiterführende Informationen. Die kostenlose App, die jetzt neu in sieben Sprachen verfügbar ist, erlaubt Pflanzenbestimmung für jedermann und überall. <https://floraincognita.com/de>

Digitaler Humanismus

Ob Pflegeroboter, Sprachassistenten wie Alexa und Siri oder elektronische Steuerungen im Auto: Die Digitalisierung rückt dem Menschen im Alltag buchstäblich immer näher. Längst steht die Frage nach einer Ethik im Raum, um die künstliche Intelligenz in ihre Schranken zu weisen. Unser Autor plädiert dafür, die Ideale des Humanismus für die digitale Welt wiederzubeleben. Sein Hauptanliegen: den Menschen in den Mittelpunkt stellen.

TEXT **JULIAN NIDA-RÜMELIN**

Als die größte Innovation der Menschheitsgeschichte gilt vielen Historikern die Erfindung von Ackerbau und Viehzucht. Die uralte und bis heute noch in Überresten existierende Kultur der Jäger und Sammlerinnen wurde von sesshaften Bauern und Viehzüchtern abgelöst. Die menschliche Spezies allerdings war in ihren wichtigsten Eigenschaften noch an die alte, überwundene Lebensform angepasst. Ackerbau und Viehzucht ermöglichten zwar

fizierung auf ihrem Höhepunkt und die kontinuierliche Verlagerung von der industriellen Produktion zu Dienstleistungen in den vergangenen Dekaden hat in den ökonomisch am weitesten entwickelten Regionen der Welt einen Lebensstandard etabliert, den es in der Geschichte der Menschheit nie gegeben hat. Die durchschnittliche Lebenserwartung steigt kontinuierlich an, obwohl auch die spätindustrielle Lebensform der Gesundheit nicht immer zuträglich ist.

Die Big-Data-Ökonomie lässt die schöne neue Welt des Internets verblassen

viel mehr Menschen als zuvor das Leben auf einer vorgegebenen Fläche, aber zugleich verschlechterte sich der durchschnittliche Gesundheitszustand, Epidemien entwickelten sich, auch Kurzsichtigkeit, Karies und Plattfüße.

Unsere heutige Lebensform ist ganz wesentlich von industriellen Technologien geprägt: Die Dampfmaschinen des frühen Industriezeitalters, die Elektri-

Möglicherweise wird sich die Digitalisierung als die vierte große technologische, eben disruptive Innovation erweisen. Jedenfalls sind sich ihre überzeugten Propheten und ihre ebenso überzeugten Kritiker darin einig, dass sich durch Digitalisierung erneut die menschliche Lebensform grundstürzend verändern wird. Allerdings weichen die euphorischen Begleitgesänge der digitalen Frühzeit – die Erwartung etwa, dass mit der Etablierung des Internets das Zeitalter individueller Freiheit und globaler Demokratie im Netz erst seine höchste Ausformung finden würde – sorgenvollen Abgesängen auf die liberale und rechtsstaatlich verfasste Demokratie im Zeichen der Wahlmanipulation durch Cambridge Analytica und russische Bots. Es hat eine Art Katzenjammer eingesetzt. Führende Vertreter der Internetideologie anarchistischer Freiheit, wie Jaron Lanier, widerrufen ihre



Mensch oder Maschine? In Zeiten künstlicher Intelligenz scheinen die Grenzen fließend zu werden.

Einschätzungen, für die sie schon vor Jahrzehnten berühmt wurden und die eine ganze Generation von Silicon-Valley-Mitarbeitern geprägt haben. Die Projektion von Hippievisionen auf das Internetzeitalter, die bis in Sphären der CEOs von Google, Microsoft, Amazon und Facebook verbreitet war, scheint nun schon der Vergangenheit anzugehören. Die schöne neue Welt, in der jede mit jedem vernetzt ist, alle die

In der Logik der künstlichen Intelligenz gibt es keine Willensfreiheit

gleichen Zugänge zu Informationen haben, in der Diktaturen nicht überleben können und der American Way of Life das Global Village bestimmt, ist verblasst. Zu offenkundig ist die Kommerzialisierung in Zeiten der Big-Data-Ökonomie.

Es wird nun klar, was auch für andere technologische Innovationen der Vergangenheit gegolten hat: Technologien sind immer ambivalent, sie können zum Guten und zum Schlechten eingesetzt werden. Es gibt keinen technologieinhärenten Mechanismus, der die Vervollkommnung der menschlichen Lebensform garantiert. Die Annahme, dass es jeweils der technische Fortschritt ist – die Entwicklung der menschlichen Produktivkräfte, die Umwandlung von Naturgütern in Gebrauchsgüter, welche die Menschheitsgeschichte vorantreibt –, der als eigentlicher Fortschrittsmotor gelten könne, ist ein marxistisches Erbe, das wir aufgeben sollten. Menschen entscheiden über die Nutzung technologischer Optionen, sie entscheiden darüber, ob die digitalen Möglichkeiten zur Humanisierung der Welt, zu ökonomischem und sozialem Fortschritt beitragen oder ob sie zu politischem Kontrollverlust, zu Medienabhängigkeit und zur Atomisierung der Gesellschaft führen. Der digitale Humanismus setzt den IT- und Internet-Euphorikern wie -Apokalyptikern die Botschaft der menschlichen Gestaltung technischen Fortschritts entgegen.

Viele Mythen seit der Antike bis ins heutige Hollywood kreisen um das Verhältnis Mensch-Maschine. Computer sind algorithmische Maschinen oder auch Turingmaschinen (nach dem Mathematiker Alan Tu-

ring). Menschen und andere hoch entwickelte Lebewesen sind keine Maschinen. Die Natur als Ganze ist keine Maschine. Der digitale Humanismus transformiert den Menschen nicht in eine Maschine und interpretiert Maschinen nicht als Menschen. Er hält an der Besonderheit des Menschen und seinen Fähigkeiten fest und bedient sich der digitalen Technologien, um diese zu erweitern, nicht um diese zu beschränken.

Wenn Menschen genauso determiniert agieren wie Turing-Maschinen, dann ließe sich all unser Verhalten prinzipiell vorhersagen. Da unser Verhalten von unseren Überzeugungen abhängt, müsste es prinzipiell möglich sein, auch die Überzeugungen, die wir in Zukunft haben werden, zu prognostizieren. Das hieße aber, dass wir das Wissen zukünftiger Gesellschaften ebenfalls prognostizieren könnten, was aber mit einem genuinen Fortschritt des Wissens unvereinbar ist und zudem logische Probleme aufwirft, auf die schon Karl Popper hingewiesen hat. Sein Argument: Die Annahme, dass auf der Basis heutigen Wissens alles zukünftige Wissen vorhersehbar sei, führt in einen logischen Widerspruch, da dann dieses Wissen im aktuellen Wissen schon enthalten wäre, es also zukünftiges, heute noch nicht realisiertes Wissen gar nicht gäbe. Eine echte Wissensrevolution setzt jedoch voraus, dass das spätere Wissen im früheren nicht schon enthalten ist. Ein umfassender Determinismus gerät mit dieser Annahme in einen unauflösbaren Konflikt.

In der Logik der KI gibt es keine Willensfreiheit. Maschinen tun das, wofür sie programmiert worden sind. Sie verhalten sich so, wie sie sollen. Wenn sie es einmal nicht tun sollten, liegt dies an Anomalien im System, also zufälligen Unregelmäßigkeiten oder Beschädigungen. Darüber hinaus haben manche softwaregesteuerten Systeme probabilistische Funktionen, die einem Zustand keinen festen Nachfolgezustand, sondern eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von Nachfolgezuständen zuordnen. Sie ermöglichen es, „lernende“ Roboter und komplexere Softwaresysteme zu konstruieren. Der Übergang von deterministischen zu probabilistischen Maschinen führt nicht zu einer Aufhebung des kategorialen Unterschiedes zwischen Mensch und Maschine. Die Alternative besteht nicht zwischen Determinismus und Probabilismus, sondern zwischen Determination und Freiheit.

Menschen denken über ihre Handlungen nach und sind in der Lage, ihre Handlungen an Gründen



auszurichten. Diese Fähigkeit, Entscheidungen zu treffen, die den besten Gründen folgen, ist das, was die menschliche Freiheit und Verantwortung ausmacht und uns von Tieren und Maschinen unterscheidet. Wenn die jeweilige Handlung vor jeder Überlegung oder Abwägung bereits festläge (oder auch nur die Wahrscheinlichkeitsverteilung der möglichen Handlungen), wäre der Akteur nicht frei und nicht verantwortlich. Ja, genau besehen gäbe es den Akteur nicht. Es gäbe dann keine Handlung, sondern lediglich bloßes Verhalten.

Ein weiteres viel diskutiertes Thema des Internetzeitalters ist die „virtuelle Kommunikation“. Der Begriff ist jedoch irreführend, Kommunikation in der sogenannten virtuellen Welt ist grundsätzlich real. Jede Kommunikation bedient sich unterschiedlicher Medien, das älteste Medium sind Zeichen und Schallwellen, spätere Kulturtechniken wie Schreiben und Lesen haben Schriftzeichen als Medium genutzt, und die Erfindung des Buchdrucks an der Schwelle zur Neuzeit hat dieses Medium massentauglich gemacht. Mit der Digitalisierung geht, anders als manche postmodernen Theoretiker meinen, nicht die Rationalität des Gutenberg-Zeitalters zugrunde, es entsteht auch keine neue Welt der Bilder ohne logische Struktur, vielmehr erweitert sich das mediale Spektrum kommunikativer Akte um eine weitere Dimension. Nichts daran ist virtuell.

Damit aber gelten für die Kommunikation im Internet dieselben Regeln wie für die Kommunikation generell. In der Sprachphilosophie ist man sich einig, dass eine erfolgreiche kommunikative Praxis nur dann zustande kommt, wenn sich die an der Kommunikation Beteiligten an bestimmte konstitutive Regeln halten. Dazu gehört die Regel der Wahrhaftigkeit. Diese verlangt, dass ich, wenn ich etwas behaupte, auch selbst davon überzeugt bin, dass das zutrifft. Ebenso können wir von unseren Kommunikationspartnern erwarten, dass sie uns vertrauen, das heißt, dass sie davon ausgehen, dass das, was ich behaupte, meinen eigenen Überzeugungen entspricht. Diese Regeln sind nur vermeintlich trivial. Sie erlegen nämlich den Kommunikationspartnern die Verpflichtung auf, sich in ihrem Äußerungsverhalten an den von ihnen eingesehenen guten Gründen zu orientieren und nicht an ihrem Eigeninteresse. In vielen Fällen würde das bloße Eigeninteresse gegen die Einhaltung der Regeln der Wahrhaftigkeit und des

Vertrauens sprechen. Wenn wir immer dann unwahrhaftig wären, wenn dies in unserem Interesse läge, würde der kommunikative Akt schlagartig an Wert verlieren.

So wie das Gesamt der alltäglichen Kommunikation auf der Einhaltung bestimmter Normen und Regeln, wie die der Wahrhaftigkeit, des Vertrauens und der Verlässlichkeit, beruht und diese Regeln als Einschränkungen allgemein akzeptiert sein müssen, um einen humanen Umgang miteinander zu ermöglichen, so gilt auch für das Internet, dass ohne funktionierende Ethosnormen die Kommunikation erodiert. Zuweilen befördern die Anonymität der Internetkommunikation, das Fehlen der Face-to-face-Situation und die Möglichkeit, unter Aliasnamen zu kommunizieren, manipulative und ausbeuterische Praktiken, welche die Regeln der Wahrhaftigkeit, des Vertrauens und der Verlässlichkeit verletzen.

Beruhigenderweise kann die Praxis der gezielten Irreführung nur parasitär funktionieren, das heißt, nur dann, wenn das Gros der Kommunikationspartner sich an die Regeln der Wahrhaftigkeit, des Vertrauens und der Verlässlichkeit hält. Dies scheint nach wie vor der Fall zu sein. Die meisten Social-Media-Gruppen, ob geschlossen oder offen, sind in auffälliger

Es sollte ein Menschenrecht auf Zugang zum World Wide Web geben

Weise von Ehrlichkeit, Stabilität und Verlässlichkeit geprägt. Der geradezu exzessive Gebrauch von Verhaltensregeln und die rigide Sanktionierung über Shitstorms und individuelle Unmutsbekundungen sind dafür ein Hinweis. Je weniger juristisch sanktionierte Normierung, desto wichtiger ist die kulturelle Praxis.

Es gehört heute zur alltäglichen Lebenswirklichkeit vieler Menschen weltweit, E-Mails zu verschicken, sich im Internet zu präsentieren, zu kommunizieren und sich Informationen aller Art zu besorgen. Doch nicht alle haben weltweit in gleicher Weise Zugang zum Internet, man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem *digital divide*, also der Spaltung in sogenannte Onliner und Offliner. >



Auch wenn die Anzahl der Offliner von Jahr zu Jahr abnimmt, spricht vieles dafür, den Zugang zum Internet heute und erst recht in Zukunft als Menschenrecht zu deklarieren. Das Grundprinzip aller Menschenrechte ist unveränderlich: Niemand darf in seiner Selbstachtung existenziell beschädigt werden. Dies ist der Kern menschlicher Würde, wie er zum Beispiel in der Ethik Immanuel Kants oder gegenwärtig in jener von Avishai Margalit einen systematischen Ausdruck gefunden hat. Die Bedingungen einer humanen Gesellschaft ändern sich jedoch mit den Zeiten und Kulturen. Was jeweils eine Praxis der Ausgrenzung und der Diskriminierung ist, liegt nicht ein für alle Mal fest, sondern hängt von den kulturellen und ökonomischen Bedingungen ab. Menschenrechte gelten nicht nur in modernen, sondern auch in traditionellen Kulturen, aber staatlich garantierte allgemeine Bildung ist erst in der Moderne ein Menschenrecht, weil die Bedingungen dafür in traditionellen Gesellschaften nicht vorliegen. Teilhabe an Kommunikation, freie Meinungsäußerung und Informationsfreiheit sind ein Menschenrecht – die Medien der Kommunikation und Information ändern sich mit den Zeiten.

Je alltäglicher digitale Techniken bei uns werden, desto lauter wird hierzulande der Ruf nach digitaler Bildung. So beklagte die Studienleiterin der International Conference of the Learning Sciences, Birgit Eickelmann, bereits 2014 in einem Interview mit der FRANKFURTER ALLGEMEINE ZEITUNG, dass zu viele Kinder nicht in der Lage sind, eigenständig mit dem Computer zu arbeiten, Präsentationen und Dokumente zu erstellen, und dass wir aus diesem Grund „in Deutschland international an verschiedenen Stellen den Anschluss verloren haben“. Sie forderte eine verbesserte digitale Bildung, womit im Allgemeinen die Vermittlung von Medienkompetenzen und der Umgang mit neuen Technologien gemeint ist. In diesem Sinne hat das Bundesbildungsministerium im Jahr 2016 die „Bildungsoffensive für die digitale Wissensgesellschaft“ ins Leben gerufen, die das Lernen mit digitalen Medien und die Vermittlung von digitalen Kompetenzen fördern soll. Neue Lern-Apps, virtuelle Bibliotheken oder Virtual-Reality-Brillen sollen verstärkt in Klassenzimmern, Hörsälen und Betrieben eingesetzt werden.

Diese Formen einer digitalen Bildungsoffensive aber kranken daran, dass ihre Ziele vage bleiben und sie lediglich den Umgang mit den Technologien in

den Mittelpunkt rücken, der für die jüngeren Generationen ohnehin selbstverständlich ist. Mit der grotesken Folge, dass dann *digital immigrants* die *digital natives* in einer Sprache unterrichten, die sie mühsam gelernt haben, während die Lernenden sie von Kindesbeinen an spielerisch beherrschen.

Im Falle der digitalen Technologien ist zudem die Veränderung der Produkte derart rasant, dass einmal erworbenes Nutzerwissen permanent erneuert werden muss und daher als Schulstoff wenig geeignet ist.

Das humanistische Ideal einer selbstständigen Urteilskraft gewinnt an Bedeutung

Wenn die Charakterisierung von Wilhelm von Humboldt heute noch zutrifft, dass Schulwissen einen kanonischen Charakter hat – im Gegensatz zu wissenschaftlichem, forschungsorientiertem Wissen –, dann gehört die Einübung des Umgangs mit digitalen Endgeräten nicht zum sinnvollen Schulstoff. Was also könnte digitale Bildung sein?

Durch die Digitalisierung ändern sich die Verfügbarkeit und die Archivierung von Datenbeständen. Auch weite Bereiche der Geisteswissenschaften, der historischen und philologischen Forschung (Quellen, Texte, Interpretationen) sind in zunehmendem Umfang allgemein verfügbar. Die zuvor aufwendigen Recherchen und Reisetätigkeiten, aber auch stundenlange Aufenthalte in Spezialbibliotheken sind heute in vielen Fällen überflüssig. Die vollständige Digitalisierung von Museumsbeständen, die gegenwärtig auf den Weg gebracht wird, aber auch die digitale Dokumentationspflicht in den Wissenschaften werden diese Situation weiter verbessern. Da der zeitliche und finanzielle Aufwand zur Datenakquise sinkt, wird diese Form akkumulierten Wissens entwertet. Damit wird Methodenkenntnis wichtiger als Datenkenntnis. In den Studiengängen schlägt sich dies schon heute dahingehend nieder, dass ganze Wissensbereiche als entbehrlich betrachtet und durch Methodentraining ersetzt werden.

Durch die Digitalisierung der Datenbereitstellung entfallen zahlreiche „Gatekeeper“, also Pfortnerfunk-

tionen, wie sie etwa Bibliothekare, Verlagslektoren, Zeitschriften-Reviewers, Zeitungs-, TV- oder Rundfunkredaktionen innehaben. Dies bedeutet, dass die eigenständige Urteilskraft zunehmend gefordert ist. Datenbereitstellung ersetzt nicht die Fähigkeit, Daten zu beurteilen und zu prüfen, ob diese zuverlässig sind und welche Argumente sich auf diese stützen lassen.

Das World Wide Web konfrontiert uns mit einer weitaus größeren Vielfalt von Interpretationen, Thesen, Theorien und Ideologien. Die Meinungsbildung wird daher anspruchsvoller. Das alte humanistische Bildungsideal, wie es im *Theaitetos*-Dialog von Platon vor 2500 Jahren formuliert wurde, das die selbstständige Urteilskraft, die Fähigkeit zu theoretischer und praktischer Vernunft in den Mittelpunkt stellt, wird dadurch massiv aufgewertet. Menschen, die dazu tendieren, suggestiv formulierten Überzeugungen zu folgen oder sich von unbequemen Tatsachen abzuschirmen, werden im neuen, digitalen Datenuniversum rasch die Orientierung verlieren. Sie schließen sich in den „Blasen“ ein, wie sie insbesondere die sozialen Medien zur Verfügung stellen, oder sie taumeln, von unterschiedlichen Einflüssen hin- und hergetrieben, durch die Datenwelt. Wir leben infolge der Digitalisierung nicht in einer Wissensgesellschaft, sondern allenfalls in einer Datengesellschaft oder besser: in einer Datenökonomie.

Am Ende weisen viele Aspekte der Digitalisierung auf ein weiteres zentrales Ziel des Humanismus, nämlich auf die Persönlichkeitsbildung. Sie ist heute aktueller denn je, und ihre Bedeutung wird durch die Digitalisierung unserer Kommunikationen und durch Interaktionen, Transfers von Daten und Dienstleistungen sowie die digitalisierte Produktion (Stichwort: Industrie 4.0) weiter zunehmen. Der Grund dafür liegt auf der Hand: Je vielfältiger, volatiler und unübersichtlicher personale Bindungen, Gemeinschaftsbildungen und Lebensformen werden, desto stärker wachsen die Ansprüche an die individuelle Fähigkeit, Autor oder Autorin der eigenen Entscheidungen, Überzeugungen und Projekte zu sein. Die digitalen Möglichkeiten schaffen neue Freiheitsspielräume, lösen eine gewaltige Veränderungsdynamik nicht nur ökonomischer, sondern auch kultureller Verhältnisse aus. Sie stärken von daher auch die Autonomiepotenziale der Individuen und setzen diese zugleich unter den permanenten Stress eines wachsenden Orientierungsbedarfes. ◀



DER AUTOR

Julian Nida-Rümelin lehrt Philosophie und politische Theorie an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Er verantwortet im Zentrum Digitalisierung.Bayern den Bereich Kultur und gehört dem Direktorium des neu gegründeten Bayerischen Forschungsinstituts für Digitale Transformation an.



DAS BUCH

Julian Nida-Rümelin
Nathalie Weidenfeld
Digitaler Humanismus
Eine Ethik für das Zeitalter der
Künstlichen Intelligenz
Piper Verlag, München 2018
Gebunden, 224 Seiten, 24 Euro



Ein Paradies in Weiß und Blau

Max-Planck-Wissenschaftler kooperieren mit Partnern in rund 120 Ländern der Erde. Hier schreiben sie über persönliche Erlebnisse und Eindrücke. Konrad Meister vom Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz hat in Kooperation mit den Universitäten in Oregon und Illinois (USA) vier Monate in der Antarktis geforscht. Er erzählt von langen Arbeitstagen, erklärt, was seine Forschung mit Speiseeis zu tun hat und warum die Antarktis ein Ort voller Gegensätze ist.

In dem Moment, als der erste Fisch anbiss und ich mir dachte: „Das gibt es doch nicht. Um dich herum ist nichts außer Eis und Schnee. Und du sitzt da und fischst“, da realisierte ich erst, dass ich nun tatsächlich in der Antarktis war. Dem südlichsten Kontinent der Erde. 16 796 Kilometer von Mainz entfernt.

Eine anstrengende Anreise lag hinter mir. Von Frankfurt ging es zunächst nach Christchurch in Neuseeland. Von dort flog ich mit einer LC-130-Maschine der US Air Force in die Antarktis zur McMurdo Station, einer alten Navy Base, die je nach Jahreszeit mehreren Hundert Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern als Unterkunft dient.

Den Alltag dort würde ich am besten mit „eat, sleep, science“ beschreiben. Da es niemals dunkel wird, ist ein Arbeitstag von 8 bis 23 Uhr keineswegs ungewöhnlich. Die Tage laufen verhältnismäßig gleich ab: Pistenbully beladen, zum Angelplatz fahren und ein Loch durch das mehrere Meter dicke Eis bohren. Anschließend heißt es erst mal: Angeln! Haben ich und meine Kollegen genug Fische gefangen, fahren wir zurück zur Station. Dort entnehmen wir den Fischen etwas Blut und setzen sie dann in spezielle Aquarien, um weitere Untersuchungen vorzubereiten.

In meiner Forschung beschäftige ich mich mit der Frage, warum Fische in der Antarktis nicht gefrieren. Als Pionier dieser Wissenschaft gilt der Amerikaner Arthur Devries. Er entdeckte in den 1960er-Jahren, dass diese Fische spezielle Proteine besitzen, die als eine Art natürliches Frostschutzmittel wirken, weshalb Devries sie Antifreeze-Proteine nannte. Mittlerweile ist einiges über deren



Dr. Konrad Meister, 36, hat an der Ruhr-Universität Bochum Biochemie studiert und in der physikalischen Chemie promoviert. Nach einem Postdoc-Aufenthalt am Forschungsinstitut AMOLF in Amsterdam – unterstützt durch ein Marie-Curie-Stipendium – ist er seit Sommer 2018 Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. In seiner Arbeit konzentriert er sich auf Proteine mit außergewöhnlichen Eigenschaften.

Funktionsweise bekannt. Nimmt ein Fisch kleine Eiskristalle auf, docken Gefrierschutzproteine daran an und verhindern, dass das Eis weiterwächst. Mich interessieren dabei besonders die molekularen Mechanismen: Wie binden diese Proteine an Eiskristalle? Ändern sie dabei ihre Struktur?


Aus diesem Grund wechselte ich ans Max-Planck-Institut für Polymerforschung in die Abteilung für Molekulare Spektroskopie, die mit hochmodernen spektroskopischen Methoden und einem ausgezeichneten Eislabor ideale Bedingungen für meine Forschung bietet. Nun fehlten nur noch die Proteine, und ich bin dankbar, dass mir Direktor Mischa Bonn erlaubte, für einige Monate auf Expedition zu gehen.

Ein wichtiges Anwendungsfeld meiner Forschung ist die Kryopräservierung mit dem Ziel, Organe und andere Gewebe einzufrieren. Aber auch in der Lebensmittelindustrie werden Antifreeze-Proteine genutzt, dort sorgen sie beispielsweise dafür, dass Speiseeis cremig bleibt. Zudem sind sie als hochpotenter Gefrierschutz für eine Vielzahl industriell genutzter Oberflächen, etwa für die Flügel großer Windkraftanlagen, von Interesse.

Die Antarktis ist ein Ort voller Gegensätze: Die unendlichen Weiten des Eises erzeugten in mir oft ein Gefühl von grenzenloser Freiheit, gleichzeitig ist man auf diesem Kontinent gefangen und an die Basisstation gebunden. Obwohl die Antarktis einer der abgelegensten Orte der Welt ist, sind auf der Station ständig Menschen um einen rum. So etwas wie Privatsphäre existiert nicht.

Darüber hinaus ist das Leben in der Antarktis sehr monoton. Angefangen beim täglichen Fischen über die immerwährende Helligkeit bis zu der Tatsache, dass man kaum Gerüche oder Geräusche wahrnimmt. Ferner bin ich über Monate hinweg mit den immer gleichen Leuten zusammen, die zudem alle ungefähr gleich alt sind. Da wünscht man sich schon, einmal eine andere Person zu sehen.

Es gibt aber Routinen, von denen ich nicht genug bekommen konnte – oder wer würde sich nicht freuen, regelmäßig Wale, Robben oder Pinguine aus nächster Nähe zu sehen? Und auch bei der Landschaft, die auf den ersten Blick nur Eis und Schnee zu sein scheint, entdeckte ich mit der Zeit immer feinere Unterschiede. Ich werde die Antarktis deswegen stets als einen besonderen Ort in Erinnerung behalten: als Paradies in Weiß und Blau.

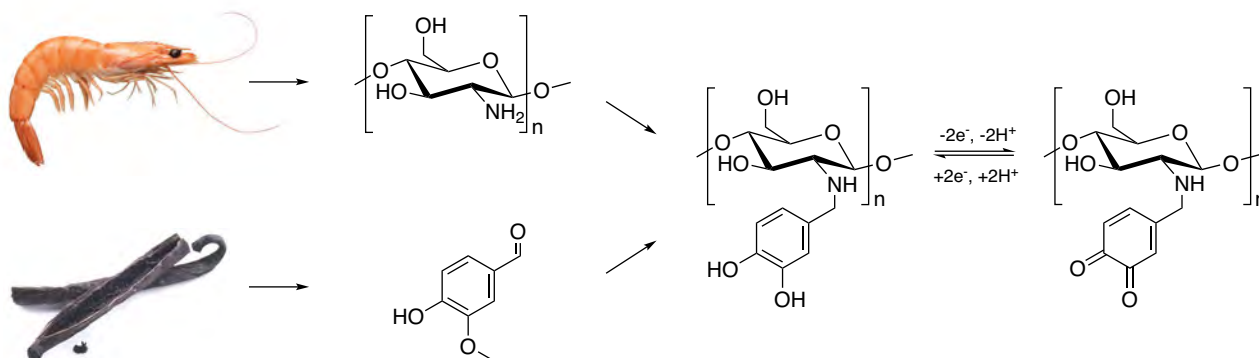


Nachhaltige Batteriekomponenten auf dem Prüfstand: Mit einem Potentiostaten untersuchen Potsdamer Forscher, wie gut die Zellen etwa mit Elektroden oder einem Elektrolyten aus nachwachsenden Rohstoffen funktionieren. Zu dem Zweck laden und entladen sie die Testsysteme mehrfach und messen dabei Strom und Spannung zwischen den Polen.

Die Keimzelle der Biobatterie

Die Energieversorgung der Zukunft hat ein Speicherproblem. Um überschüssigen Strom von Windkraft- und Solaranlagen für Zeiten aufzuheben, in denen es zu wenig davon gibt, sind leistungsfähige Batterien und Kondensatoren gefragt, die aus möglichst ungiftigen und nachhaltigen Materialien bestehen sollten. Daran arbeiten **Clemens Liedel** und **Martin Oschatz** am **Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung** in Potsdam.

TEXT **KARL HÜBNER**



Ein Rezept für eine organische Kathode: Max-Planck-Chemiker verknüpfen Chitosan aus Krabbenschalen mit Vanillin, dem Aroma der Vanille, das sich auch aus Holz erzeugen lässt. So möchten sie etwa Lithiumcobaltoxid ersetzen, das heute für die Kathoden von Lithiumakkus verwendet wird und aus politischen und ökologischen Gründen bedenklich ist.

Ein Hauch von Vanille liegt in der Luft. Das würde man in einem Chemielabor nicht unbedingt erwarten. Schon gar nicht, wenn dort an Batteriematerialien geforscht wird. „Das kommt vom Vanillin“, sagt Clemens Liedel und schmunzelt. Aber wer sich jetzt darauf freut, dass ihm gleich Reste vom Weihnachtsgebäck oder von einem frisch

gebackenen Geburtstagskuchen angeboten werden, wird enttäuscht. Keine Backwaren, nirgends. In Liedels Labor dient die Substanz derzeit als Ausgangsstoff für ein mögliches Elektrodenmaterial der Zukunft.

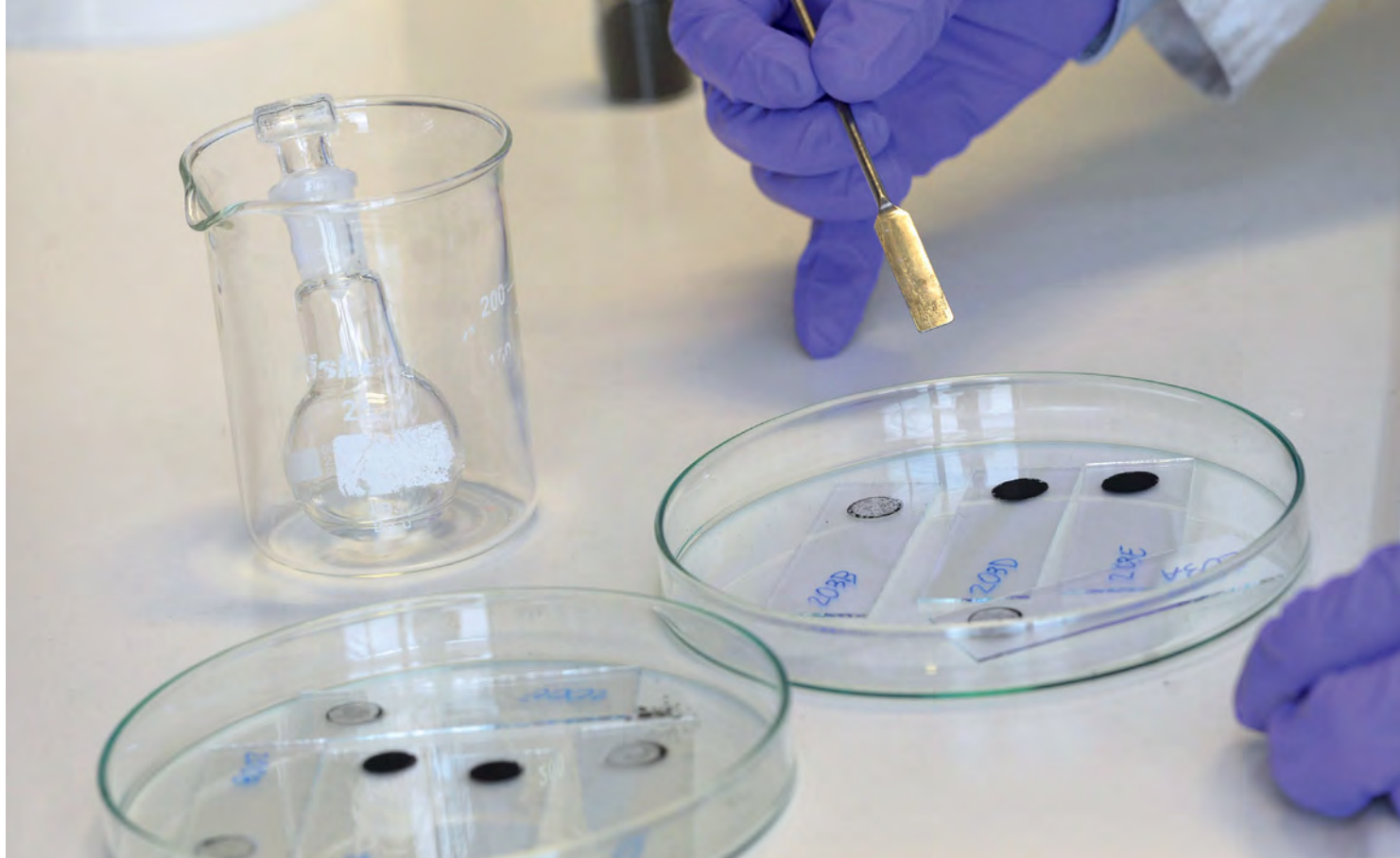
Clemens Liedel leitet am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam die Arbeitsgruppe „Nachhaltige Materialien

für die Energiespeicherung“. Der Name ist Programm. Denn im besten Falle sollen diese neuen Batteriewerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen und dabei nahezu unbegrenzt verfügbar sein. Für heutige Lithiumbatterien gilt genau das nicht. Lithium etwa ist ein eher seltenes Metall, von dem es weltweit nicht viele Lagerstätten gibt. In etwa zwei Dritteln aller Lithiumbatterien ist außerdem Cobalt im Einsatz, ein Metall, dessen Gewinnung häufig mit sozialen und ökologischen Verwerfungen in den Herkunftsländern einhergeht. Hinzu kommen Elektrolyte, die mitunter giftig oder auch brennbar sind. Angesichts des derzeit stark wachsenden Bedarfs an Speicherkapazität sind das noch keine optimalen Voraussetzungen.

Im Vanillinansatz sieht Clemens Liedel eine deutlich nachhaltigere Alternative. Denn die Substanz lässt sich aus einem der häufigsten Stoffe überhaupt herstellen – aus Lignin, einer Hauptkomponente von Holz. Jahr für Jahr produziert die Natur viele Milliarden Tonnen davon.



Gute Mischung: In den Glaskölbchen setzen die Potsdamer Chemiker Chitosan und Vanillin zu einem nachhaltigen Elektrodenmaterial um.



Aber wie kann ein organisches Molekül als Material für einen Stromspeicher dienen? Schließlich denkt man bei Batterien eher an Metalle, etwa an Blei, Cadmium oder eben Lithium. „Was man braucht, sind ganz allgemein Substanzen, die Elektronen abgeben und danach auch wieder aufnehmen können“, erklärt Liedel. „Das können Metalle sein, die dann zu Metallionen werden, aber auch organische Substanzen.“

Konkret schwebt den Potsdamer Forschern vor, statt schwermetallhaltiger Stoffe wie etwa Lithiumcobaltoxid Vanillin an der Kathode, also am Pluspol von Lithiumbatterien, einzusetzen. Doch das ist nicht ganz einfach. Man kann ein sprödes Pulver wie oxidiertes Vanillin nicht einfach als Elektrodenmaterial verwenden. „Normalerweise vermischt man die Substanz mit einem Bindemittel zu einer kompakten Masse und macht diese durch Zusatz von Kohlenstoff noch leitfähig“, erklärt Liedel. Das habe auch funktioniert. Allerdings war der Ansatz dem Chemiker nicht nachhaltig genug. Das Bindemittel, ein fluorhaltiges Polymer, bereitete ihm noch Kopfschmerzen.

Zwischenzeitlich hatten die Potsdamer ihr Vanillin daher chemisch an das biobasierte Polymer Chitosan gebunden und das Ganze dann mit Rußparti-

keln vermischt – ganz ohne Bindemittel. Chitosan ist ein zuckerähnliches Polymer, das sich zum Beispiel aus der Schale von Garnelen gewinnen lässt. Ruß wird derzeit zwar noch aus fossilen Brennstoffen gewonnen, ließe sich aber auch aus Biomasse herstellen. Ganz aktuell testen die Potsdamer ein reines Vanillin-Kohlenstoff-Gemisch, das nach einer chemischen Veränderung des Vanillins sowohl ohne Bindemittel als auch ohne Chitosan auskommt.

EINE NACHHALTIGERE LÖSUNG FÜR ELEKTROLYTE

Für den Test als Elektrodenmaterial trägt ein Mitarbeiter das Substanzgemisch hauchdünn auf Kohlepapier auf. Daraus stanz er ein kleines, kreisrundes Stück aus, das er in ein Kunststoffgehäuse bugsiert. Danach kommen noch eine Trennmembran, ein Elektrolyt und eine Gegenelektrode in die Kammer. Damit ist die Batterie komplett. An zwei Edelstahlzylindern, die aus dem Kunststoffgehäuse ragen, lässt sich nun die Batteriespannung messen. An diesem Tag sind es 3,1 Volt.

Die Wissenschaftler testen aber nicht nur das. „Wir machen immer auch Langzeittests, in denen sich Entlade- und Ladevorgänge abwechseln“, sagt

Sorgt für Durchblick: Um die Eigenschaften der nachhaltigen Elektrodenmaterialien zu untersuchen, tragen die Forscher diese auf Objektträger mit Kohlepapier auf.

Liedel. „So sehen wir, ob sich unsere Elektrode überhaupt für häufige Ladezyklen eignet.“ Für wiederaufladbare Batterien natürlich eine zwingende Voraussetzung. Auch dabei habe der jüngste Vanillinansatz schon überzeugt.

Viele Gedanken macht sich die Gruppe von Clemens Liedel auch über künftige Elektrolyte. Der Elektrolyt ist jene Komponente in einer Batterie, die mit ihren beweglichen Ladungsträgern, den Ionen, für den elektrischen Ladungsausgleich zwischen den beiden Polbereichen sorgt. Üblicherweise besteht er aus einem an die Elektroden angepassten Leitsalz und einem Lösungsmittel. „Aktuell sind hier Lösungen giftiger Lithiumsalze in brennbaren organischen Carbonaten üblich“, erklärt Liedel. Dem Chemiker schwebt eine nachhaltigere und auch sicherere Lösung vor.

Auch dabei gibt es erste Erfolge. Clemens Liedel betritt ein weiteres seiner Labore, greift nach einem Rundkolben, schwenkt ihn kurz in der Luft, und schon sieht man eine farblose Masse zäh hin- und herschwappen. >

„Das ist eine ionische Flüssigkeit“, sagt Liedel. So nennt man Salze, die schon bei Temperaturen unter 100 Grad Celsius flüssig sind. Wie alle Salze besteht die Flüssigkeit aus positiv geladenen Kationen und negativ geladenen Anionen. „Ionische Flüssigkeiten sind gut leitend für andere Ionen, kaum flüchtig und damit auch schwer entflammbar“, erklärt der Forscher, warum sich diese Stoffgruppe als Lösungsmittel für Elektrolyte empfiehlt.

Und: Ionische Flüssigkeiten gibt es auf rein organischer Basis; sie lassen sich somit im besten Falle aus nachwachsenden Rohstoffen gewinnen. Für Liedel ist noch etwas wichtig: „Sie sind chemisch gut designbar.“ So lässt sich sowohl die Ionenleitfähigkeit der Moleküle gut einstellen als auch der Temperaturbereich, in dem sie flüssig sind. Inzwischen hat seine Gruppe eine geeignete ionische Flüssigkeit gefunden, die sich bereits zur Hälfte aus nachwachsenden Rohstoffen herstellen lässt.

Natrium- oder Magnesiumbasis. „Wir müssen aber noch einige Detailfragen klären“, sagt Liedel. Zum Beispiel die, wie gut sich die ionische Flüssigkeit mit einem biobasierten Elektrodenmaterial wie dem oxidierten Vanillin chemisch verträgt.

Dass polymerbasierte Batteriewerkstoffe derzeit als besonders aussichtsreich und nachhaltig gelten, zeigt auch ein im April 2019 gestartetes Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Sechs Jahre lang wird die DFG insgesamt zwölf Millionen Euro für ein entsprechendes Forschungsnetzwerk bereitstellen, zu dem auch die Gruppe von Clemens Liedel zählt.

Das einzige Batteriebauteil, zu dem Liedel bisher keine eigene Materialforschung macht, ist der Minuspol. Aktuell besteht diese Anode meist aus einer Lithium-Graphit-Kombination. Zwar sind bereits andere Metalle wie Natrium oder Magnesium im Gespräch, die deutlich besser verfügbar und auch nachhaltiger wären. Allerdings gilt es noch eine Reihe technischer Fragen zu klären, ehe sie in der Praxis zum Einsatz kommen können.

Daran arbeitet auch Martin Oschatz. Der Institutskollege hat seine Labore nur wenige Schritte von denen Liedels entfernt. Er leitet die Arbeitsgruppe „Kohlenstoffnanomaterialien für umwelt- und energierelevante Anwendungen“, und zu diesen Anwendungen zählt auch der Einsatz in Stromspeichern. Oschatz tüfelt an Kohlenstoffmaterialien mit Poren von sehr genau definierter Größe. Grundsätzliches Ziel dabei: eine möglichst große Oberfläche mit möglichst vielen Stellen, an denen zum Beispiel Metallatome anhaften können. Genau das würde auch die Speicherdichte von Anoden verbessern.

Eine Anode liefert beim Entladen die Elektronen, indem in der Regel ein Metall diese abgibt und dann als positiv geladenes Ion, also als Kation, vorliegt. Am einfachsten wären also Elek-

1 Siliciumdioxidform mit Ausgangsstoffen



2 Kohlenstoffmaterial in der Gussform



3 Poröser Kohlenstoff



Gebackener Stromspeicher: Um ein Material für leistungsfähige Superkondensatoren herzustellen, füllen die Potsdamer Chemiker eine hochkonzentrierte wässrige Lösung der Ausgangsstoffe Zucker und Salz in eine Form aus Quarz (Siliciumdioxid, 1). Unter Hitze und Luftabschluss verwandelt sich der Zucker in Kohlenstoff, in dem das verdampfende Salz Poren hinterlässt (2). Die Siliciumdioxidform ätzen die Forscher weg, sodass nur das poröse Kohlenstoffmaterial zurückbleibt (3).

HOCHZEIT DER BATTERIEKOMPONENTEN

In kommerziellen Batterien liegen die beiden Pole in der Regel dicht beieinander. Um einen elektrischen Kurzschluss zu vermeiden, befindet sich zwischen ihnen noch eine feinporige Trennwand. Dieser Separator ist für die Ionen des Elektrolyten durchlässig. Das erlaubt den Ladungsausgleich, der nötig ist, sobald Elektronen vom Minuspol über einen Verbraucher zum Pluspol wandern oder wenn die Batterie geladen wird. Üblicherweise dienen erdölbasierte Kunststoffmembranen als Separator. Auch hier hat Liedels Gruppe schon eine Alternative im Angebot. Die hat sich bei den Arbeiten mit Chitosan, sozusagen ganz nebenbei, aufgetan. Die Forscher haben die Chitosanketten durch den Zusatz weiterer Substanzen einfach zu einem Netzwerk an Makromolekülen mit kleinen Poren verknüpft. Versuche damit seien bereits erfolgreich gewesen. „Vor allem die Anionen wandern gut durch die Poren“, so Liedel.

Nach so viel Grundlagenforschung an einzelnen Batteriekomponenten schwebt der Gruppe nun der nächste große Schritt vor. „Jetzt wollen wir versuchen, alle Ansätze miteinander zu verheiraten“, formuliert es Liedel. Also das organische Kathodenmaterial mit der ionischen Flüssigkeit, der Chitosanmembran und einer Anode auf



troden aus genau diesem Metall. Doch dies lässt sich bei manchen Metallen kaum realisieren. Lithium wird deshalb üblicherweise mit Graphit kombiniert, wobei die Lithiumatome zwischen den Kohlenstoffschichten des Graphits eingelagert werden.

PORÖSER KOHLENSTOFF FÜR SUPERKONDENSATOREN

Martin Oschatz arbeitet an einer ähnlichen Lösung für Natrium. „Die Einlagerung in Graphit funktioniert mit Natrium nicht“, sagt Oschatz. Der Kohlenstoffchemiker hat aber schon eine andere Lösung gefunden. Ein Kohlenstoffpolymer mit zwei wichtigen Besonderheiten: Das flächige Makromolekül bildet von sich aus siebartige Poren. Und: Am Rand dieser Poren haben die Chemiker durch geschickte Wahl der Ausgangsverbindungen Stickstoffatome eingebaut. „Diese sorgen dafür, dass Metallatome stabil eingelagert werden“, erklärt Oschatz.

Allerdings gab es erst einmal noch einen Haken. Der hohe Stickstoffanteil fördert zwar die Bindungskraft für Natrium, verschlechtert aber die Leitfähigkeit für die Elektronen, die das Nat-

rium bei der Entladung abgibt. Ähnlich wie Liedel seine organischen Kathodenmaterialien musste auch Oschatz sein Polymer daher noch mit Ruß zusammenbringen, um zu einem tauglichen Elektrodenmaterial zu gelangen. Konkret beschichten die Potsdamer dazu hauchdünne Kohlenstoffäden mit ihrem Kohlenstoff-Stickstoff-Polymer. Die Speicherdichte ihres Materials sei für Natrium bereits relativ gut, sagt Oschatz nach ersten Tests.

Anders als Liedel hat Oschatz nicht nur Batterien im Blick. Das stickstoffreiche poröse Kohlenstoffpolymer habe sich daneben auch schon als Katalysatormaterial für die energieeffiziente Synthese von Ammoniak bewährt. Und weil die Poren gerade Kohlendioxidmoleküle gut festhalten, eigne sich das Material darüber hinaus noch gut als CO₂-Filter, etwa für die Rauchgasreinigung, so Oschatz zu weiteren umweltrelevanten Anwendungen.

Und auch bei der Stromspeicherung hat der Chemiker noch ein anderes Einsatzgebiet als Biobatterien vor Augen. Er möchte hochporösen Kohlenstoff als Elektrodenmaterial in Superkondensatoren einsetzen. Die in ihnen gespeicherte Energie lässt sich sehr schnell



Ganz oben Keine oberflächliche Frage: Milena Perovic und Martin Oschatz bereiten eine Messung vor, mit der sie die Oberfläche von Kohlenstoffmaterialien bestimmen. Das Gerät ermittelt, wie viel Gas die vier Proben aufnehmen können, die sich dabei in Kühlgefäßen befinden.

Oben Saubere Sache: Vor der Oberflächenmessung werden die Proben unter Vakuum aufgeheizt, um flüchtige Substanzen zu entfernen, die das Untersuchungsergebnis verfälschen würden.



Stoff zum Nachdenken: Clemens Liedel und Martin Oschatz diskutieren neue Ideen, wie sich nachhaltigere Materialien für Energiespeicher entwickeln lassen.

abrufen. Darüber hinaus haben Kondensatoren in der Regel eine deutlich längere Lebensdauer als Batterien. Allerdings ist die Energiemenge, die sich in ihnen speichern lässt, bisher auch viel kleiner. Superkondensatoren kommen bereits dort zum Einsatz, wo kurzfristig große Strommengen benötigt werden, etwa beim Anfahren von Straßenbahnen. Auch manche Autos gewinnen Bremsenergie mit Superkondensatoren zurück.

Die Kondensatoren, mit denen sich Martin Oschatz beschäftigt, speichern elektrische Energie in einem elektrischen Feld, also indem zwei Elektroden entgegengesetzt aufgeladen werden. Um die Ladung auszugleichen, lagern sich jeweils entgegengesetzt geladene Ionen aus einem Elektrolyten an den Elektroden an. Wie viel Ladung ein Kondensator speichert und wie schnell er sich lädt beziehungsweise entlädt, hängt davon ab, wie schnell die Elektroden wie viele Ionen aufnehmen und abgeben.

Schon die derzeit in vielen Superkondensatoren übliche Aktivkohle verfügt mit rund 1500 Quadratmetern je Gramm über reichlich Kontakt zur Außenwelt. Doch Oschatz war damit nicht

zufrieden. „Die Porosität von Aktivkohle ist aufgrund des Herstellprozesses eher zufällig und völlig ungeordnet“, sagt der Chemiker. Er möchte ein Material, dessen Oberflächenverlauf bis hinunter in den Bereich von Nanometern, also bis auf einige millionstel Millimeter, klar definiert ist. Und zwar so, dass das Material beim Anlegen einer Spannung möglichst rasch möglichst viele Ionen aufnehmen und auch wieder abgeben kann.

EIN PARKHAUS FÜR IONEN

Als besonders leistungsfähiges Elektrodenmaterial für die Energiespeicher setzt Martin Oschatz deshalb auf ein fast reines Kohlenstoffmaterial mit einer großen Oberfläche und einer ausgefüllten Porenstruktur. Es kann viel mehr Ionen schneller binden und wieder freisetzen als der stickstoffhaltige Kohlenstoff, den Oschatz' Gruppe für Natriumbatterien entwickelt hat.

Das Elektrodenmaterial ist deshalb so leistungsfähig, weil es entlang seiner Kontaktflächen mit dem Elektrolyten genügend Poren gibt, die Ionen aufnehmen können, ohne dass sie danach an-

dere Ionen blockieren. Oschatz spricht gerne von einer Art Parkhaus: „Wir brauchen viele Straßen, die als Zuwege fungieren, und entlang dieser Wege benötigen wir ausreichend Parkbuchten.“

Um solche Nanoparkhäuser zu bauen, stellt das Team von Martin Oschatz aus einem speziellen Silicat zuerst eine Art winziger Backformen her, deren Hohlräume genau dem gewünschten Aufbau des Parkhauses entsprechen. Im Wesentlichen bestehen die Model aus unzähligen, parallel angeordneten Röhren. Der Abstand zwischen benachbarten Röhren beträgt wenige Nanometer. Die Backformen füllen die Forscher mit einem Gemisch aus Zucker und Salz und schieben das Ganze bei rund 800 Grad Celsius in den Ofen.

Unter Luftabschluss pyrolysiert der Zucker, zurück bleibt Kohle. Das Salz dagegen verdampft im Ofen und hinterlässt Hohlräume – die Parkbuchten für die Ionen. Über die Salzmenge steuern die Chemiker die Porengröße und können dabei Parkplätze in der Größenordnung von einem Nanometer oder sogar weniger formen. Anschließend lösen die Forscher die Backform chemisch auf, und zurück bleiben un-

zählige Kohlenstoffstäbchen, die jeweils über kleine Stege miteinander verbunden sind. „Die leeren Räume zwischen den Stäben sind dann unsere Straßen“, sagt Oschatz. Über sie erreichen die Ionen ihre Parkplätze.

NIEDRIGERE KOSTEN JE GESPEICHERTER KILOWATTSTUNDE

Mit ihrer definiert designten Porosität bringen die Forscher es inzwischen auf eine spezifische Oberfläche von bis zu 3000 Quadratmetern je Gramm. Ein halbes Fußballfeld also in wenigen Krümeln Kohle. Die Größe der Oberfläche bestimmen sie mit einem Gerät, das misst, wie viele Teilchen eines Gases an eine bestimmte Menge ihrer Materialien binden. Daraus schließen sie auf die spezifische Oberfläche ihrer Substanzen.

Gemessen haben sie natürlich auch schon, wie schnell sich ihr Material lädt und wieder entlädt. „Wir hatten bereits Proben, die zehnmal so schnell geladen und entladen werden konnten wie Aktivkohle“, sagt Oschatz. Auch die Speicherdichte habe die bisheriger Elektrodenmaterialien übertroffen.

Solche Ansätze verfolgt auch Sebastian Pohlmann mit Interesse. Er leitet die Material- und Zell-Entwicklung bei Skeleton Technologies, dem einzigen Hersteller von Superkondensatoren in Europa, und tüftelt am Standort Großröhrsdorf an Elektroden mit besseren Eigenschaften. „Mehr Ordnung in die Struktur der Porosität zu bringen, ist hierbei ganz wichtig“, so Pohlmann.

Und was ist mit der Nachhaltigkeit? Auf den ersten Blick erscheint Saccharose als wesentlicher Ausgangsstoff ähnlich nachwachsend zu sein wie das von Clemens Liedel für die Vanillinherstellung genutzte Lignin. „Saccharose ist natürlich zunächst ein Lebensmittel“, räumt Oschatz ein, betont aber, „dass die Substanz als Elektrodenrohstoff dennoch deutlich nachhaltiger als etwa Lithium oder Cobalt ist.“ Ein weiteres Plus

für die Umwelt bestehe darin, Materialien mit besonders großer Speicherdichte und langer Lebensdauer zu entwerfen.

Von den bisherigen Ergebnissen ist auch Markus Antonietti begeistert. Er leitet am Potsdamer Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung die Abteilung Kolloidchemie, in der Clemens Liedel und Martin Oschatz forschen. Markus Antonietti hält es für denkbar, die Kosten je gespeicherter Kilowattstunde Strom mit den neuen Materialien für Superkondensatoren eines Tages deutlich senken zu können. Ziel müsse es jetzt sein, die Speicherdichte so weit zu steigern, dass die Energiespeicher eines Tages vielleicht sogar den Job bisheriger Batterien übernehmen können.

Und Antonietti hat noch eine Vision: „Irgendwann muss jeder Haushalt über einen eigenen Stromspeicher verfügen und im Sommer schon die Energie für den nächsten Winter laden.“ Das wären Energiemengen, die sich mit heutigen Batterien nicht nachhaltig speichern lassen. „Daher brauchen wir metallfreie, am besten nachwachsende Materialien“, so Antonietti. Er freut sich daher auch, wenn von Liedels Laboren manchmal ein Hauch Vanille herüberweht. Künftige Anwender solcher Speicher kämen freilich nicht in den Genuss des Dufts. In einer Batterie verarbeitet, wäre das Vanillin chemisch gebunden – und damit geruchsneutral. ◀

 www.mpg.de/podcasts/energie

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Derzeit gängige Batteriesysteme basieren auf Rohstoffen, mit denen ein nachhaltiger Ausbau der Speicherkapazitäten kaum möglich ist.**
- **Max-Planck-Forscher untersuchen daher Batteriekomponenten wie Elektroden, Elektrolyte oder Separatoren aus nachwachsenden Rohstoffen wie Vanillin, Chitosan und entsprechenden ionischen Flüssigkeiten.**
- **Sie versuchen auch die Speicherdichte sowie die Lade- und Entladegeschwindigkeit von Superkondensatoren zu steigern, indem sie dafür Elektrodenmaterialien mit größerer Oberfläche und möglichst genau definierter Struktur entwickeln.**

GLOSSAR

Anode: Gemeinsam mit der Kathode bildet sie die Elektroden, an denen in einer Batterie, einer Elektrolyse- oder einer Brennstoffzelle elektrische Energie in chemischer Energie gespeichert und wieder zurückverwandelt wird. Wenn eine Batterie oder ein Akkumulator entladen wird, geben Anionen, also negativ geladene Teilchen aus den Elektrolyten, oder neutrale Metallatome des Elektrodenmaterials Elektronen ab, die über einen äußeren Stromkreis zur Kathode fließen.

Elektrolyt heißt das leitfähige Medium zwischen zwei Elektroden. Es enthält Ionen, die den Stromfluss zwischen den Elektroden sicherstellen und zum Beispiel in Batterien und Akkumulatoren an den elektrochemischen Prozessen an den Elektroden beteiligt sind.

Kathode: Sie nimmt Elektronen aus dem äußeren Stromkreis auf und gibt sie an den Elektrolyten ab. An ihr werden zum Beispiel metallische Kationen in ungeladene Metallatome verwandelt.

Separator: Eine Membran, üblicherweise aus einem porösen Kunststoff, die Anoden- und Kathodenraum voneinander trennt. Sie verhindert einen Kurzschluss zwischen beiden Elektroden, ist allerdings für Ionen durchlässig, sodass durch den Elektrolyten ein Strom fließen kann.

Ein Labyrinth der Technik: Verborgen unter einem Gewirr von Leitungen, Stützen und Gängen liegt die Plasmakammer von Wendelstein 7-X.

W





Funken in der Sternenmaschine

Es wäre eine völlig neue Energiequelle: Die Kernfusion soll die Kraft der Sonne auf die Erde holen. Einen Weg zu dieser Form der Energieerzeugung verfolgen Forscher um **Thomas Klinger**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Plasmaphysik** in Greifswald, mit der Anlage Wendelstein 7-X.

TEXT **ROLAND WENGENMAYR**

Den eigentlichen Torus kann man kaum erkennen“, sagt Matthias Hirsch beim Anblick von Wendelstein 7-X. Mit „Torus“ meint der Plasmaphysiker das ringförmige Herzstück des 725 Tonnen schweren Kolosses aus Metall, der vor uns die mehrere Stockwerke hohe Halle füllt. Der Ring verbirgt sich hinter einer für Laien verwir-

renden Vielfalt aus über 250 Rohranschlüssen und Stützen. Das Ganze umgibt auch noch ein Gerüst aus Treppen, Balkonen und Zugangsbrücken, dazwischen Rohrleitungen, Kabelstränge und Geräteschränke.

Wir befinden uns am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Greifswald, und Hirsch führt zielsicher durch dieses Labyrinth. Bei einem Gerät aller-

dings muss selbst er über dessen Zweck nachgrübeln. Aber das kann man ihm nicht verdenken, schließlich klettern wir durch das Außengerüst einer enorm komplexen Maschine, an der inzwischen mehr als zweihundert Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Europa, Australien, Japan und den USA forschen. Auch ein Experte wie Hirsch kann da nicht jedes Detail wissen.

Deutsche Forscher vor allem der Max-Planck-Gesellschaft haben Wendelstein 7-X federführend aufgebaut. Das Projekt dient einem großen wissenschaftlichen Ziel: der Nutzung des Sonnenfeuers als nahezu unerschöpflicher Energiequelle etwa für die Stromerzeugung. Bei 15 Millionen Grad verschmelzen tief in der Sonne Atomkerne des Wasserstoffs – Protonen – zu Atomkernen des Heliums und setzen dabei enorme Energiemengen frei. Ohne diesen solaren Fusionsofen wäre die Erde ein kalter, toter Planet.

Allerdings verschmelzen die leichten Wasserstoffatome nur in der Gravitationspresse der Sonne, unter einem unvorstellbaren Druck von etwa 200 Mil-

liarden Erdatmosphären. Kein festes Material könnte das auf der Erde auch nur annähernd aushalten. Die Solarenergie schlechthin hier zu nutzen, wäre also ein Traum geblieben, hätten nicht findige Physiker eine Alternative entdeckt. Bereits in der Mitte des 20. Jahrhunderts stellten sie fest, dass auch Atomkerne des schweren Wasserstoffs Deuterium, das neben dem Proton ein Neutron besitzt, und von Tritium, einem superschweren Wasserstoff mit zwei Neutronen, zu Helium verschmelzen.

KERNFUSION – EINE NEUE FORM DER ENERGIEERZEUGUNG

Diese Fusionsreaktion läuft in einem extrem dünnen, heißen Gas ab – und wegen des geringen Drucks lässt sie sich leichter technisch umsetzen. Allerdings sind dafür noch höhere Temperaturen als in der Sonne nötig, nämlich weit über 100 Millionen Grad. In einem solchen Hochtemperaturplasma sind Elektronen und Atomkerne vollkommen voneinander getrennt. Beide sind elektrisch geladen, deshalb kann

ein starkes Magnetfeld sie einschließen – wie eine immaterielle Thermoskanne. Und das ist der Trick, auf den die Forschung setzt.

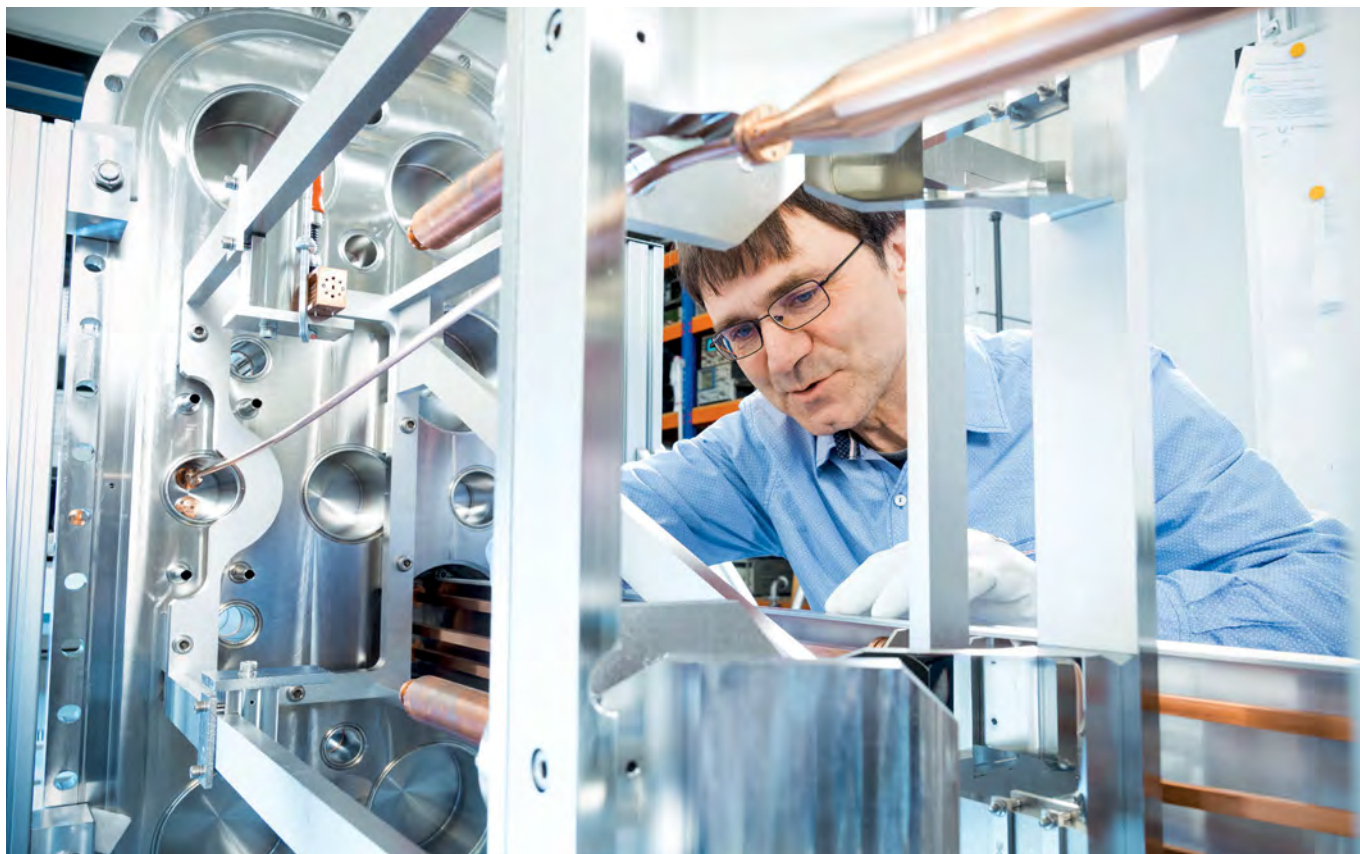
Im Plasmagefäß eines zukünftigen Fusionskraftwerks wäre nur etwa ein Gramm des Helium-Tritium-Gemischs enthalten. Dieses Fast-Nichts an Brennstoff könnte 90 000 Kilowattstunden an Wärmeenergie produzieren. Das entspricht der Verbrennungswärme von elf Tonnen Kohle, die aber über 30 Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre blasen, wenn sie verfeuert werden. Fusionskraftwerke dagegen wären im Betrieb klimaneutral. Neben dem extrem geringen Brennstoffverbrauch ist dies das große Zukunftsversprechen in einem Jahrhundert, in dem der Klimawandel unser Leben zunehmend bestimmt.

Die Aussicht auf eine klimafreundliche Energiequelle dürfte auch der Grund sein, warum Robert Habeck, Bundesvorsitzender von Bündnis 90/Die Grünen sich für die Forschung öffnen zeigte, als er Wendelstein 7-X kürzlich besuchte. Bei der Grundsteinlegung für die Anlage 1997 hatten Anhänger der Partei noch dagegen protestiert. „Heute beschreiben wir die Atomfusion unideologischer“, sagte Habeck. Die Grundlagenforschung sei faszinierend und sollte vorangetrieben werden. „Es ist grundsätzlich richtig, Alternativen in der Energieversorgung zu erforschen.“

Fusionsenergie sei die einzig neue Form primärer Energieerzeugung, an der die Menschheit forscht, betont Thomas Klingner: „Sie ist gewissermaßen das letzte noch ungeöffnete Energiefass.“ Als wolle die Sonne diese Feststellung unterstreichen, leuchtet sie warm ins Zimmer des Max-Planck-Direktors, der den Greifswalder Standort des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik leitet. Der drahtige Physikprofessor wirkt, als könne er jederzeit aufspringen und zum Schraubenschlüssel greifen. Tatsächlich schlüpft der Grundlagenforscher zeit-

DER WEG ZUR KERNFUSION

Die Fusion zwischen Deuterium und Tritium zu Helium soll in einem sehr dünnen, heißen Plasma realisiert werden. Die schweren Wasserstoffkerne setzen schon bei relativ wenigen Kollisionen genügend Energie frei, um die Fusionsreaktion in Gang zu halten. Ein zukünftiges Fusionskraftwerk wird damit allerdings zu einer kerntechnischen Anlage. Im Vergleich zu heutigen Atomkraftwerken hat es jedoch entscheidende Vorteile. Bei einer Havarie kann es keine Kernschmelze geben, weil das empfindliche Plasma einfach ausgeht. Das radioaktive Tritium wird zudem direkt im geschlossenen Fusionskraftwerk erbrütet und verbraucht. Da zudem nur wenige Gramm Brennstoff notwendig sind, gibt es keine Entsorgungsprobleme wie bei Atomkraftwerken. Es fällt auch kein tonnenschwerer radioaktiver Abfall an, der viele Jahrtausende gelagert werden muss. Wenn das Plasmagefäß am Lebensende eines Fusionskraftwerks demontiert wird, sind nur Innenteile radioaktiv. Sie müssen einige Jahrzehnte lang sicher gelagert werden, also über einen für menschliche Zivilisationen überschaubaren Zeitraum.



Zugriff für die Forscher: Matthias Hirsch bereitet einen Stutzen vor, durch den Sensoren verschiedener Analysegeräte Daten über die Eigenschaften des Plasmas schicken.

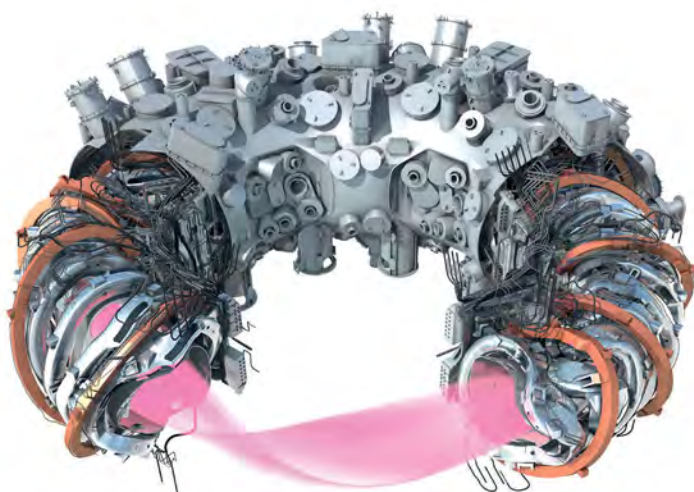
weilig in die Rolle eines Baustellenleiters, und zwar auf einer sehr komplexen Baustelle. Denn die Greifswalder Forscher müssen sich Stück für Stück in technisches Neuland vorarbeiten.

Wendelstein 7-X selbst ist allerdings keine kerntechnische Anlage und nicht für eine Kernfusion konstruiert. In dem Experiment studieren Physiker das Verhalten des heißen Plasmas in einem Stellarator und verwenden dafür leicht-

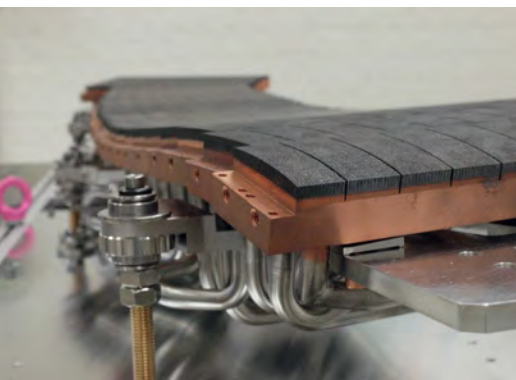
ten Wasserstoff. Ein Stellarator ist einer der beiden Typen von Fusionsanlagen, die derzeit erforscht werden. Die Greifswalder Sternenmaschine soll – als das bislang größte Stellarator-Experiment – demonstrieren, dass solche Anlagen grundsätzlich ein heißes Plasma ausreichend effizient und dauerhaft einschließen können. Das würde den Weg zu einem Fusionskraftwerk nach diesem technischen Prinzip eröffnen.

Gerade wird Wendelstein 7-X für die nächste Messkampagne umgerüstet, drei Kampagnen von je 15 Wochen hat die Anlage schon hinter sich. Am 10. Dezember 2015 leuchtete das erste Plasma aus einem tausendstel Gramm Helium bei einer Million Grad auf – das Helium sollte als Putzmittel Verunreinigungen aus dem Plasmagefäß entfernen. Das ist wichtig, weil Wasserstoffplasmen hochempfindlich sind. Am 3. Februar 2016 erzeugten die Greifswalder Forscher – im Beisein von Bundeskanzlerin Angela Merkel – dann zum ersten Mal ein Plasma aus Wasserstoff.

Geheizt wird das Plasma mit verschiedenen Techniken. Die Elektronen lassen sich mit einer kräftigen Mikrowellenstrahlung in Schwung bringen – eine hohe Temperatur bedeutet nichts anderes als schnelle Bewegung der Teilchen. Da die Elektronensuppe im Plasma sich mit den Wasserstoffkernen



Bauplan eines Magnetkäfigs: 70 Magnetspulen, die auf die Kammer aufgefädelt sind, zwingen das Plasma (rosa) in eine in sich gewundene Form. Zahllose Öffnungen in der Hülle der Anlage ermöglichen einen Zugang in ihr Inneres.



Kühlung und Filter: Die gesamte Plasmakammer ist mit mehr oder weniger quadratischen Grafitkacheln ausgekleidet. Die deutlich kleineren rechteckigen Grafitäfelchen bedecken den Divertor, der sich wie ein Band durch die Kammer zieht (großes Bild). Durch seine Prallplatten laufen Wasserleitungen (kleines Bild), die in einem Fusionskraftwerk Wärme aus dem Plasma zu Generatoren führen sollen. Der Divertor kühlt das Plasma aber nicht nur, an Helium-durchflossenen Kühlschlangen in seiner Wand frieren auch Verunreinigungen aus.

durchmischt, erwärmt sie auch diese mit. Als zweite Heizmethode testen die Greifswalder das Einschießen von schnellen Wasserstoffatomen ins Plasma. Die Protonen sollen zukünftig auch direkt über eine starke Radiostrahlung geheizt werden.

Schon jetzt hat Wendelstein 7-X einige Rekorde gebrochen, die andere Plasmaexperimente des Stellarator-Typs aufgestellt hatten. Dazu gehörten nahezu halbminütige Entladungen mit einer Plasmatemperatur von weit über 40 Millionen Grad Celsius. In anderen Entladungen bei niedriger Dichte erreichten die Elektronen sogar eine Temperatur von 100 Millionen Grad. Das war auch das technische Maximum in dieser Ausbaustufe, denn bisher wurden die Wände des Plasmaexperiments nicht aktiv gekühlt. Daher heizt sich das Innere von Wendelstein 7-X auf, zum einen durch die Wärmestrahlung des Plasmas, zum anderen durch auf die Wand prallende, heiße Teilchen, die dem Magnetkäfig entkommen. So musste sich das Plasmagefäß nach längeren Entladungen für den nächsten Schuss erst einmal etwa eine Viertelstunde lang abkühlen.

Derzeit ruht die Anlage für ungefähr zwei Jahre, damit das Greifswalder Team eine aktive Wasserkühlung einbauen kann. Damit soll Wendelstein 7-X halb-stündige Plasmaentladungen bei sehr hohen Temperaturen verkraften. „Eine Wasserkühlung klingt banal“, sagt Klinger, „bedeutet aber bei uns, unter extremen Qualitätsanforderungen zu klempern.“ Da jedes der Hitze ausgesetzte Teil des Plasmagefäßes an das Kühlsystem angeschlossen werden muss, sind insgesamt vier Kilometer Wasserleitungen nötig. „Das ist sehr viel verzweigtes Wasser“, sagt Klinger.

DER DIVERTOR ZAPFT AUS DEM PLASMA FUSIONSWÄRME AB

Eine besondere Herausforderung ist dabei das Hochvakuum, das bei Betrieb in der Plasmakammer herrschen muss. Die Greifswalder fürchten vor allem ganz kleine Lecks in den Wasserleitungen, die sich nur schwer aufspüren lassen. Eine „Tropfnase“, so Klinger, könne über abdampfendes Wasser bereits das Vakuum zerstören. Entsprechend hoch sind die Anforderungen beim Umbau.

Die größten technischen Ansprüche muss jedoch der Divertor erfüllen, der auf der Innenwand des Rings sitzt. Er besteht aus aneinandergereihten High-techplatten, die bei Betrieb in den Rand des heißen Plasmas hineinragen. Entsprechend hohe Temperaturen müssen sie aushalten. In einem zukünftigen Kraftwerk sollen ähnliche Platten jenen Anteil der Fusionswärme aus dem Plasma abzapfen, der über einen nach außen führenden Wasserkreislauf Dampfturbinen antreiben soll.

Die Prallplatten des Divertors sind bei Betrieb einem gewaltigen Wärmestrom von rund 10 Megawatt pro Quadratmeter ausgesetzt – was etwa der Heizleistung von 4000 typischen Mikrowellen-Küchengeräten entspricht. „Das ist so ungefähr das Höchste, was heute bekannte Materialien aushalten können“, erklärt Klinger. Es gleicht den Verhältnissen, denen ein Raumfahrzeug beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre ausgesetzt ist, wo ebenfalls ein heißes, leuchtendes Plasma entsteht. Die Prallplatten des Divertors bestehen deshalb aus demselben Material wie die Hitzekacheln auf der Unterseite der früheren amerikanischen Space-shuttles: aus Kohlenstoff, in den Kohlefasern eingebettet sind.

Die Kohlefasern sorgen zum einen für die mechanische Stabilität des Verbundwerkstoffs, zum anderen transportieren sie die Wärme in Richtung Gefäßwand. Anders als beim Space-shuttle während der Eintrittsphase müssen sie aber nicht nur wenige Minuten durchhalten, sondern gut eine halbe Stunde. Aus diesem Grund muss der neue Divertor, der nun eingebaut wird, Wärme zwischen den Prallplatten und der wassergekühlten Wand extrem gut leiten. Dafür haben die Greifswalder Forscher zusammen mit Industriepartnern eine vollkommen neue Verbindungstechnik entwickelt.

Doch die Wärmeabfuhr ist nur eine von mehreren Funktionen des Divertors. Darüber hinaus soll er das Plasma sauber halten und wie ein Staubsauger für Verunreinigungen wirken. Diese

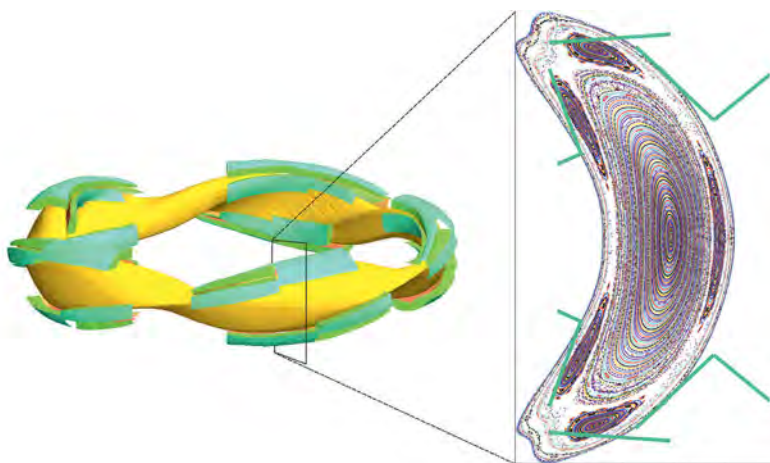
entstehen beim unvermeidlichen Kontakt des dünnen Plasma-Außenbereichs mit der Wand. Verunreinigungen, die in das heiße Plasma gelangen und dort zum Leuchten angeregt werden, entziehen dem Plasma unerwünscht Energie. Schon ein kleiner Wärmestrom dieser Art kann das dünne Plasma entscheidend abkühlen.

DER BAU – EIN RIESIGES DREIDIMENSIONALES PUZZLE

Darüber hinaus hilft der Divertor, die Anzahl der Wasserstoffteilchen unter Kontrolle zu halten. Daher ist unter den Divertorprallplatten eine sogenannte Kryopumpe in die Wand eingebaut. Eine solche Kältepumpe funktioniert im Prinzip wie eine kalte Getränkedose, die im Sommer mit Wasser aus der Luft beschlägt, sobald man sie aus dem Kühlschrank geholt hat. Allerdings wird diese Greifswalder Pumpe mit flüssigem Helium gekühlt, das eine Temperatur von minus 269 Grad Celsius hat. „Dann bleiben dort alle kleinen Teilchen kleben“, sagt Klinger. Die Kryopumpe erfordert aber, dass das Greifswalder Team zwischen den Wasserleitungen zusätzlich die Leitungen für das flüssige Helium unterbringen muss.

Mit flüssigem Helium werden auch die großen supraleitenden Spulen gekühlt, die das starke Magnetfeld für den Plasmaeinschluss erzeugen. 70 dieser Spulen sind auf der gesamten Plasmakammer aufgefädelt, wie Armreife an einem Handgelenk. Die meisten der Spulen besitzen eine kompliziert gewundene Geometrie und erzeugen so ein mehrfach in sich verschraubtes Magnetfeld. Dieses Feld zwingt möglichst viele der herumflitzenden Wasserstoffkerne und Elektronen auf magnetische Achterbahnen, die sie immer wieder zurück ins Innere des heißen Plasmas schleudern. Es sollen ja möglichst wenige heiße Teilchen entkommen.

Nicht nur wegen der individuell geformten Spulen ähnelte der Bau von Wendelstein 7-X einem riesigen, dreidimensionalen Puzzle, in dem tonnenschwere Einzelteile extrem präzise zusammengefügt werden mussten. Zunächst baute das Greifswalder Team mit seinen Partnern fünf jeweils 120 Tonnen schwere Module auf. Danach fügten die Monteure diese mithilfe der Deckenkräne in der Halle zum Torus des Plasmagefäßes zusammen. Die Zahl der Module hängt von der Form des Plasmas ab. „Wenn wir von oben draufschauen könnten, wäre es ein Fünfeck



Anatomie des Plasmas: In sein mehrfach verdrehtes Band (gelb) ragen die Divertorplatten (grün). Ein Querschnitt (rechts) zeigt die innere Struktur des heißen, elektrisch geladenen Gases.

mit abgerundeten Ecken“, erklärt Matthias Hirsch während seiner Führung.

Das komplexe Magnetfeld macht das Stellarator-Konzept komplizierter als das konkurrierende Tokamak-Prinzip, nach dem auch die große Iter-Anlage im französischen Cadarache gebaut wird. Tokomaks sind wesentlich einfacher konstruiert, weshalb sie schon weiter entwickelt sind. Die europäische Forschungsanlage Joint European Torus (JET) in der britischen Stadt Culham erreichte bereits 1991 die erste, kurze kontrollierte Kernfusion in einem Plasma aus Deuterium und Tritium. In Iter soll die Fusion erstmals mehr Leistung liefern, als das Heizen des Plasmas erfordert. Mit diesem Nettoenergiegewinn soll die Vorstufe zum ersten Demonstrationskraftwerk erreicht werden.

DIE ZWEI KONZEPTE DER KERNFUSION IM VERGLEICH

Im Vergleich zu Stellaratoren besitzen Tokamaks ein viel einfacher geformtes, perfekt ringförmiges Plasma. Allerdings muss darin ein starker Ringstrom fließen, der das Plasma in seinem schlauchförmigen Magnetfeld zusammenhält. Dieser Ringstrom führt zu zusätzlichen Turbulenzen im Plasma, die kontrolliert werden müssen. Zudem funktioniert ein Tokamak wie ein großer Transformator, bei dem das Plasma eine Spule darstellt. Da der Plasmastrom nur entsteht, wenn sich der Strom in der Spule verändert, wird an die Spule eine gepulste Spannung angelegt. Daher kann ein Tokamak nur pulsformige Plasmaentladungen erzeugen, sodass die Anlage sich ständig ändernden Belastungen ausgesetzt ist.

„Die dauernden zyklischen Belastungen des Materials und die zyklischen Kräfte beim Hoch- und Herunterfahren möchte man vermeiden“, erklärt Sibylle Günter, Direktorin am Max-Planck-

Physiker und auch mal Bauleiter: Thomas Klinger ist für die Plasmaforschung in Greifswald verantwortlich und hat den Bau von Wendelstein 7-X begleitet.



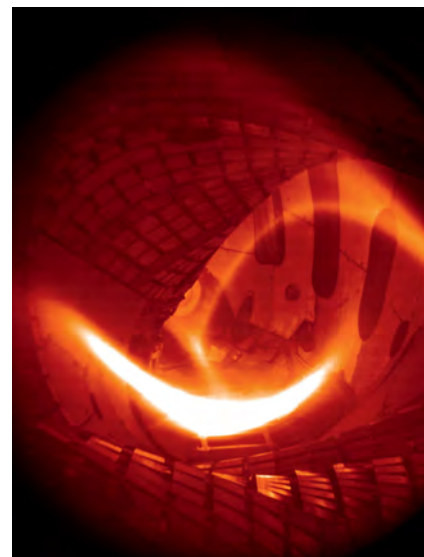
Institut für Plasmaphysik. Daher wird international an Konzepten geforscht, mit denen die Pulse auf mehrere Stunden verlängert werden oder sogar ein gleichförmiger, also stationärer Betrieb erreichbar ist. 2016 demonstrierte etwa ein Team des Garching IPP-Standorts am dortigen Tokamak Asdex Upgrade, dass dies geht, indem der Plasmastrom von außen angetrieben wird. „In der zweiten Operationsperiode soll Iter solche Szenarien für einen stationären Tokamak-Betrieb testen“, sagt Günter.

Ein Stellarator hingegen kommt als ein reiner Magnetkäfig ohne den starken Ringstrom aus und eignet sich von vorneherein für den Dauerbetrieb. Das macht Stellaratoren so interessant. In den ersten Jahrzehnten, in denen sie erforscht wurden, bildete aber die komplizierte Form des Magnetfelds ein unüberwindliches Hindernis: Lange konnten die Anlagen nicht ausreichend heiße Plasmateilchen gefangen halten. Das änderte sich, als Theoretiker am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching in den 1980er-Jahren das Konzept des Advanced Stellarators, des fortgeschrittenen Stellarators, mit den komplex geformten modularen Spulen entwickelten. In den fortgeschrittenen Stellaratoren lassen sich nun die für den Start einer Kernfusionsreaktion nötigen Temperaturen erreichen. Dieser Durchbruch gelang auch, weil die gestiegene Computerleistung erstmals eine genaue Berechnung der komplizierten Magnetfeldgeometrie ermöglichte.

In den ersten Durchgängen hat Wendelstein 7-X bereits so viele neue Daten produziert, dass die Physikerinnen und Physiker mit der Auswertung auch während des Umbaus gut beschäftigt sind. Sollte das Experiment mit der neuen Wasserkühlung das Ziel von halbstündigen Plasmaentladungen erreichen, stellt sich die Frage, wann es ein erstes Fusionskraftwerk nach dem Stellarator-Prinzip geben könnte. „Geben Sie Wendelstein bis Mitte der Zwanzigerjahre Zeit“, antwortet Klinger. „Der weitere Weg wird auch davon abhängen, welche Ergebnisse Iter liefert.“

Ein Hauptziel von Iter ist der Nettoenergiegewinn aus der Fusion, betont Sibylle Günter. Sie weist aber auch auf eine andere wichtige Frage hin, die Iter klären soll: Wie wird sich das entstehende Fusionsprodukt – extrem schnell herumflitzende Heliumkerne – auf das Plasma auswirken? „Diese schnellen Heliumkerne können zum Beispiel auch Instabilitäten im Plasma anregen“, sagt sie: „Da gibt es ganz neue Physik zu erforschen, was ich persönlich besonders spannend finde.“ Bis zur kommerziellen Nutzung der Fusionsenergie liegt vor Forschern und Ingenieuren jedenfalls noch eine Marathonstrecke. Ob dabei der Stellarator oder der Tokamak am Ende das Rennen machen wird, ist noch offen. Immerhin haben die Greifswalder Wissenschaftler das Stellarator-Konzept aber schon jetzt ein gutes Stück vorangebracht. ◀

 www.mpg.de/podcasts/energie



Das erste Wasserstoffplasma: Von Bundeskanzlerin Angela Merkel am 3. Februar 2016 gezündet, brannte es für eine Viertelsekunde und erreichte rund 80 Millionen Grad.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

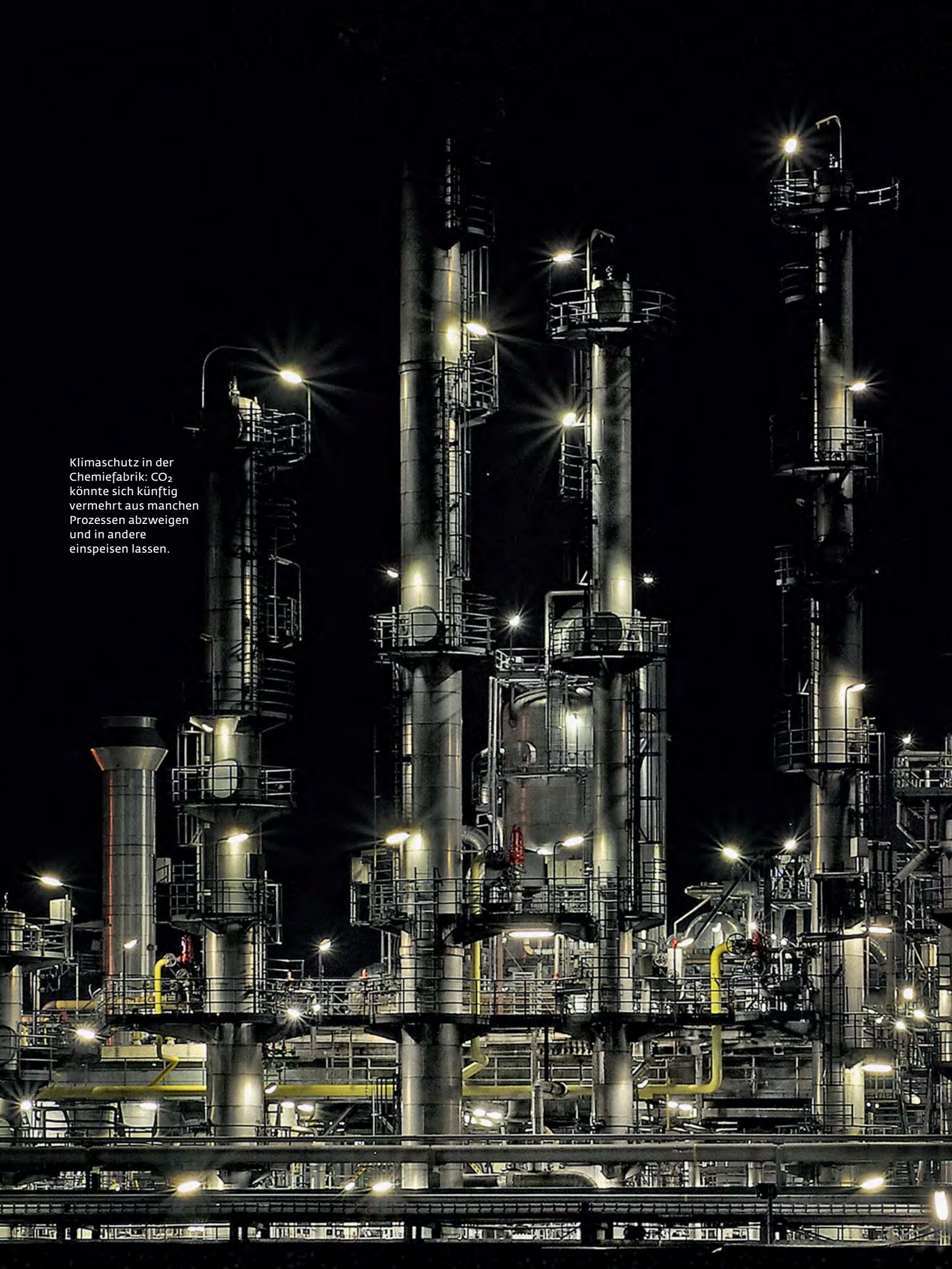
- Die Kernfusion könnte eine völlig neue Möglichkeit eröffnen, Energie in Form von Wärme oder Strom zu erzeugen. Einen Ansatz, auf diese Weise das Sonnenfeuer auf die Erde zu holen, verfolgen Forscher des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik mit dem Stellarator Wendelstein 7-X.
- Im Stellarator muss ein über 100 Millionen Grad heißes Plasma dauerhaft – im Experiment soll es eine halbe Stunde sein – im Käfig eines Magnetfelds eingeschlossen werden. In der derzeitigen Ausbaustufe konnte Wendelstein 7-X für jeweils eine halbe Minute mehr als 40 Millionen Grad heiße Plasmen erzeugen.
- Anders als der konkurrierende Tokamak, der sich technisch leichter umsetzen lässt und bereits weiter gediehen ist, erlaubt der Stellarator von vorneherein einen Dauerbetrieb. Das würde die technische Nutzung erleichtern.

GLOSSAR

Plasma: Ein Gas, dessen Atome oder Moleküle ganz oder teilweise ionisiert sind, die sich also von einem Teil der Elektronen oder allen getrennt haben. Ein Plasma entsteht etwa bei sehr hohen Temperaturen.

Stellarator: In einer Kernfusionsanlage dieses Typs würde ein in sich gewundenes Plasma allein durch ein komplex geformtes äußeres Magnetfeld eingeschlossen. Die Konstruktion der Spulen, die dieses Feld erzeugen, ist daher ausgesprochen schwierig.

Tokamak: In diesem Anlagentyp formt das Plasma einen perfekten Ring und erzeugt das Magnetfeld, das diesen einschließt, durch einen Ringstrom teilweise selbst. Ohne zusätzliche technische Maßnahmen, die allerdings noch nicht ausgereift sind, lässt sich ein Tokamak nur pulsartig betreiben.



Klimaschutz in der
Chemiefabrik: CO₂
könnte sich künftig
vermehrt aus manchen
Prozessen abzweigen
und in andere
einspeisen lassen.

Ein Klimagas befeuert die Chemie

Ausgerechnet CO₂ könnte der chemischen Industrie helfen, ihre Klimabilanz zu verbessern. Mit Energie aus erneuerbaren Quellen könnte es sich in Komponenten für Kunststoffe und andere Produkte einbauen lassen – wenn sich dafür geeignete Katalysatoren und Produktionsverfahren finden. Danach suchen Forscher um **Walter Leitner** am **Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion** in Mülheim an der Ruhr.

TEXT **PETER HERGERSBERG**

Ein Gespräch mit Walter Leitner kann den Blick auf die Welt verändern. Gut möglich, dass man um sich herum dann vor allem eins sieht: Kohlenstoff. Klar, als Element des Lebens bildet er das chemische Rückgrat aller Organismen, ist wesentlicher Bestandteil aller Nahrungsmittel und aller Materialien, die uns die Natur liefert: Holz, Stärke oder Baumwolle.

Aber auch Kunststoffe, die Farben unserer Kleidung, Medikamente und Treibstoffe – überall Kohlenstoff. Auch wenn wir diese Produkte für künstlich halten, ohne die Leistung der Natur gäbe es sie nicht. „Durch die Photosynthese haben Pflanzen vor Jahrmillionen den Kohlenstoff gebunden, den wir heute in Form von Kohle, Erdöl und Erdgas als Energieträger und Rohstoff für die Chemieproduktion nutzen“, sagt Walter Leitner, Direktor am Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion in Mülheim an der Ruhr und Professor für Technische Chemie an der RWTH Aachen.

Doch wenn wir Menschen die Erde in ihrer heutigen Form erhalten wollen, dürfen wir nicht länger auf diese fossile Form des Wirtschaftens setzen. Denn alle kohlenstoffhaltigen Rohstoffe enden über kurz oder lang als CO₂, ein Großteil davon in der Atmosphäre, wo es den Klimawandel anheizt. Um ihn einzudämmen, vollziehen viele Volkswirtschaften bereits eine Wende. So wird Strom in Deutschland und weltweit heute zu immer größeren Teilen aus regenerativen Quellen, vor allem aus Windkraft und Photovoltaik, gewonnen. Die Energieversorgung könnte so allmählich von fossilen Ressourcen unabhängig werden, und mehr noch: Sie könnte unabhängig vom Kohlenstoff werden.

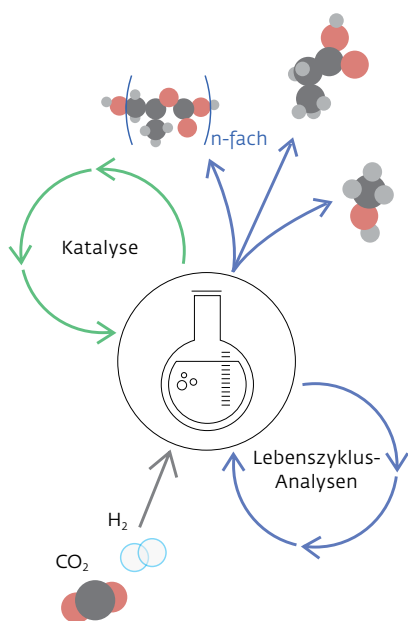
„In der chemischen Wertschöpfung werden wir Kohlenstoff aber immer brauchen“, sagt der Chemiker. Er will daher dazu beitragen, die Chemieproduktion wenigstens unabhängig von fossilen Kohlenstoffquellen zu machen. Und er setzt dabei ausgerechnet auf CO₂ – das Abfallprodukt, das die fossi-

len Rohstoffe am meisten in Verruf bringt. Walter Leitner und seine Mitarbeiter wollen vor allem Erdöl, da wo es sinnvoll ist, durch CO₂ ersetzen und so den Einstieg in eine Kreislaufwirtschaft mit CO₂ ermöglichen.

DEN CO₂-FUSSABDRUCK DER CHEMIEINDUSTRIE REDUZIEREN

„Prinzipiell könnten wir CO₂ sogar aus der Atmosphäre zurückgewinnen. Aber selbst in einem nicht-fossilen Energiesystem steht uns CO₂ in großen Mengen aus vielen Industrieprozessen zur Verfügung. Wenn wir diese Rohstoffquellen erschließen könnten, würden wir den CO₂-Fußabdruck der chemischen Industrie erheblich reduzieren“, sagt der Max-Planck-Forscher.

Das klimaschädliche CO₂ zum Rohstoff zu machen, klingt wie eine elegante Lösung, um die Chemieindustrie und das Klima zu versöhnen, ist aber knifflig. Denn CO₂ ist chemisch sehr träge, um nicht zu sagen völlig apathisch. Chemisch gesprochen: Der



Oben Rohstoff Treibhausgas: CO₂ kann mit Wasserstoff (H₂) und anderen Substanzen zu verschiedenen Produkten reagieren. Katalyse steuert die Reaktionen dabei zum jeweils gewünschten Stoff. Analysen des Lebenszyklus stellen sicher, dass der gesamte Prozess nachhaltiger ist als ein Verfahren mit fossilen Ausgangsmaterialien.

Unten CO₂-Sauger: Prinzipiell ist es möglich, das Gas aus der Umgebungsluft zu filtern und zu nutzen, wie die Firma Climeworks mit einer Demonstrationsanlage zeigt.



Kohlenstoff trennt sich extrem ungern vom Sauerstoff. Nicht von ungefähr wird CO₂ in Feuerlöscher abgefüllt, um Brände zu bekämpfen.

Dabei mangelt es nicht an Substanzen, die den Sauerstoff noch lieber an sich binden als der Kohlenstoff. Wasserstoff ist da zum Beispiel noch gieriger. Aber um die Bindung zwischen Kohlenstoff und Sauerstoff aufzubrechen, bedarf es erst einmal einer erklecklichen Menge Energie. „Aus Sicht des Klimaschutzes ist es daher vor allem dann sinnvoll, CO₂ chemisch zu nutzen, wenn diese Energie aus regenerativen Quellen kommt“, sagt Walter Leitner. „Die Technik für solche neuen Schnittstellen zwischen Energie und Chemie entwickeln wir zum Beispiel in Power-to-X.“ Der Max-Planck-Direktor koordiniert dieses vom Bundesforschungsministerium geförderte Projekt, an dem sich Partner aus Wissenschaft, Industrie und aus anderen Teilen der Gesellschaft beteiligen.

ZWEI ZIELE: EINFACHE UND HÖHERWERTIGE PRODUKTE

Ein Weg hin zu einer Chemieproduktion, die CO₂ verwertet, beginnt mit der Elektrolyse von Wasser, die mit nachhaltig erzeugtem Strom Wasserstoff erzeugt. Künftig ließe sich so elektrische Energie speichern, wenn Windkraft- und Solaranlagen davon gerade mehr liefern, als gebraucht wird. Den Wasserstoff bringen Chemiker dann mit CO₂ ins Geschäft.

Die Mülheimer Forscher haben es dabei zunächst auf ziemlich einfache Substanzen abgesehen: Methanol, Formaldehyd und Ameisensäure. Diese Substanzen entstehen, wenn sich jeweils ein CO₂-Molekül mit unterschiedlich vielen Wasserstoffteilchen einlässt. Die Industrie verarbeitet sie massenhaft zu allen möglichen Erzeugnissen wie etwa Kunststoffen. Methanol ist zudem als Treibstoff interessant. Walter Leitner und sein Team möchten aber noch weitergehen. Sie wollen das Klimagas und den Was-

serstoff mit anderen chemischen Bausteinen zusammenbringen und so direkt Polymere oder Bestandteile von Arzneimitteln herstellen. „Solche höherwertigen Produkte sind am Anfang einer CO₂-Kreislaufwirtschaft konkurrenzfähiger als einfache Basischemikalien und lassen sich leichter im Markt einführen“, sagt Leitner.

Dass eine solche Verwertung von CO₂ in der Chemieindustrie nachhaltig sein kann, hält auch Caroline Gebauer für möglich. Sie ist für den BUND, den Bund für Umwelt und Naturschutz, an Power-to-X beteiligt und begleitet das Projekt aus Sicht des Umwelt- und Klimaschutzes. Aus dieser Perspektive sieht sie synthetische Treibstoffe, die aus regenerativem Strom und CO₂ erzeugt werden, derzeit allerdings kritisch.

„Mit elektrischer Energie erst Wasserstoff zu produzieren und diesen zu einem synthetischen Treibstoff weiterzuverarbeiten, kostet ein Vielfaches mehr an Energie als die direkte elektrische Nutzung“, sagt Caroline Gebauer. „Daher ist das für uns nur in Anwendungsbereichen wie der Schifffahrt und dem Flugverkehr, wo es derzeit keine direktelektrische Alternative gibt, denkbar.“ Walter Leitner hält jedoch auch Kraftstoffe, die aus Wind, Sonne und Treibhausgas entstehen, für zukunftsträchtig. „Chemische Energieträger ermöglichen es, erneuerbare Energien über große Entfernungen zu transportieren und mit der bestehenden Infrastruktur zu verteilen“, sagt der Forscher. „Das wird für ein nachhaltiges globales Energiesystem unverzichtbar bleiben.“

Egal ob Treib- oder Kunststoff: Der Knackpunkt bei der chemischen Nutzung von CO₂ sind Katalysatoren, die dem Gas chemisch auf die Sprünge helfen. Sie sind das Spezialgebiet von Walter Leitners Team.

Vermutlich jeder kennt den Katalysator im Auto, der Schadstoffe in unbedenkliche Substanzen umwandelt. Ganz allgemein sind Katalysatoren die Partnervermittler der Chemie: Sie senken



Katalysatorforschung für eine nachhaltige Chemie: Christophe Werlé (links) und Alexis Bordet suchen molekulare Partnervermittler, die CO_2 gezielt mit anderen Substanzen wie etwa Wasserstoff verbandeln.

den Energiebedarf für eine chemische Reaktion, steuern sie in eine gewünschte Richtung und machen eine Umwandlung oft erst möglich. Wenn es darum geht, CO_2 als Rohstoff zu nutzen, müssen sie alle drei Aufgaben erfüllen.

MIT EINEM KATALYSATOR FÜR AMEISENSÄURE FING ES AN

Katalysatoren, die das leisten, untersuchen Walter Leitner und seine Mitarbeiter schon seit einer Weile etwa für die Herstellung von Ameisensäure. Das Molekül entsteht bei der Hochzeit von einem CO_2 -Molekül mit genau einem Wasserstoffmolekül. Leitners Interesse daran kommt nicht von ungefähr, denn mit der Ameisensäure fing sein Weg in die CO_2 -Chemie an, und zwar schon während seiner Promotion an der Universität Regensburg. Damals nutzte er Ameisensäure als Wasserstoffquelle für chemische Reaktionen, wo-

bei als Nebenprodukt CO_2 entstand. „Da habe ich mich aus reiner Neugier gefragt, ob sich dieser Prozess auch umkehren lässt“, sagt der Chemiker. Und tatsächlich, es ging – mit einem molekularen Katalysator, der ein Atom des Edelmetalls Rhodium enthält.

Das Metallatom in solchen Katalysatoren stachelt die chemische Angriffslust eines Reaktionspartners oder gar beider an – wie stark, hängt von der Art des Metalls ab. Sie beeinflusst entscheidend, wie viel Wasserstoff sich das CO_2 einverleibt und welche zusätzlichen Partner es mit einbindet. Was dabei herauskommt, bestimmen aber auch die Liganden – oft kompliziert gebaute organische Moleküle, die Phosphor oder Stickstoff als Anknüpfungspunkte zum Metall enthalten. Sie hüllen das Metallatom fast vollständig ein, sodass sich die Reaktionspartner daran häufig nur in bestimmten Positionen zueinander anlagern können. Idealerweise bleibt

ihnen dann nur ein einziger Weg, miteinander zu reagieren – der zum gewünschten Produkt.

Katalysatoren, die CO_2 und Wasserstoff auf diese Art und Weise gezielt verbandeln, sucht Christophe Werlé, der in Walter Leitners Abteilung eine eigene Arbeitsgruppe leitet. Manchmal geht es ihm auch darum, einen vorhandenen Katalysator zu optimieren. Seine erste Frage lautet dabei immer, warum ein Katalysator tut, was er tut. So will er Ansatzpunkte finden, das chemische Hilfsmittel besser zu machen. Etwa damit es das gewünschte Produkt mit höherer Ausbeute erzeugt und weniger Nebenprodukte entstehen. Aber Christophe Werlé will Katalysatoren auch dazu bringen, besonders schwierige Partnerschaften zu stiften, zum Beispiel die von CO_2 und Wasserstoff im Formaldehyd.

In der Praxis ist das mit viel Kreativität und nicht zuletzt Fleißarbeit verbunden. Denn Christophe Werlé und

Chemiebetrieb im Labor: Mit einem Hochdruckreaktor untersuchen die Mülheimer Forscher Reaktionen, an denen Gase wie CO₂ oder Wasserstoff beteiligt sind (links). In der Miniaturversion einer Industrieanlage bereitet Andreas Vorholt ein Experiment vor, um die Langzeitstabilität eines Katalysators zu testen (rechts).

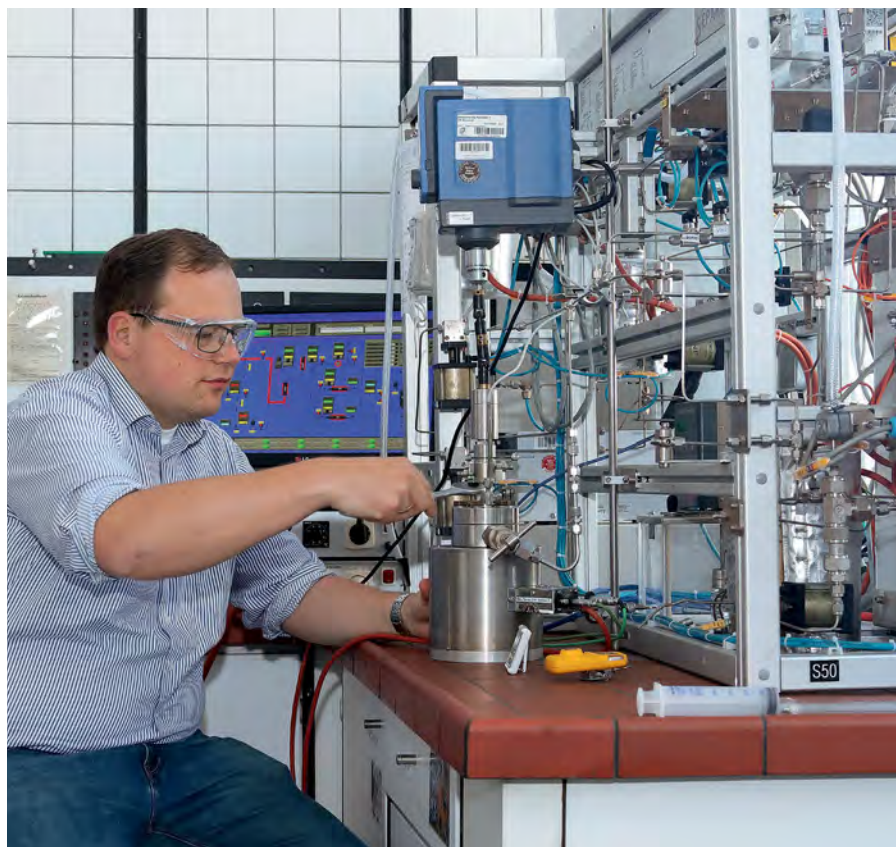
seine Mitarbeiter haben es auf die Zwischenprodukte abgesehen, in denen der Katalysator als Vermittler zwischen den Ausgangsstoffen selbst lockere Verbindungen mit den Partnern in spe eingeht. Diese kurzlebigen Konstrukte verraten den Wissenschaftlern die Reaktionswege und mögliche alternative Routen. In der Kurzlebigkeit liegt aber ein Problem. Kaum entstanden, verändern sich die Konglomerate wieder. „Wir versuchen, mögliche Strukturen der Zwischenprodukte über die Variation der Liganden so zu stabilisieren, dass wir sie analysieren können“, sagt Christophe Werlé.

Solche Experimente geben den Mülheimer Chemikern etwa Fingerzeige, wie sie CO₂ in Methanol verwandeln können. Jüngst fand ein Team aus Leit-

ners Mitarbeitern in Aachen und Mülheim erstmals sogar einen Katalysator, der statt eines Edelmetalls das kostengünstige und in der Natur weitverbreitete Mangan enthält und mit dem CO₂ zu Methanol umgesetzt werden kann.

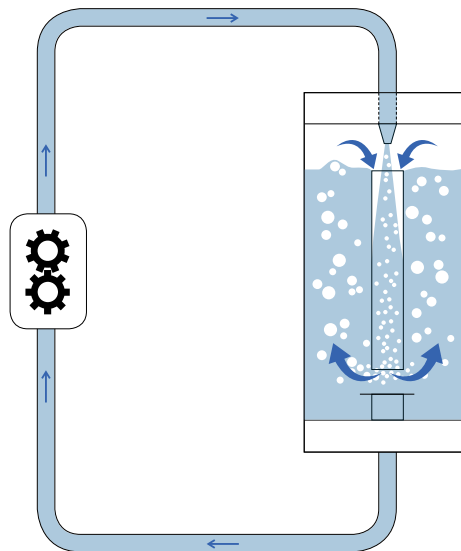
EDELMETALLKATALYSATOREN ARBEITEN EFFIZIENTER

Walter Leitner freut sich zwar über diesen Erfolg, ist aber überzeugt, dass auch edelmetallhaltige Katalysatoren in der Chemieproduktion Anwendung finden können. Denn in den Katalysatoren für CO₂-Umwandlungen seien die Liganden meist mindestens so teuer wie das Metall. Zudem arbeiteten Edelmetallkatalysatoren oft deutlich effizienter als



Fotos: Thomas Hobirk (2)

Durcheinandergewirbelt: Mit einem Düsen-Umlaufreaktor erzeugen die Mülheimer Chemiker einen möglichst engen Kontakt zwischen Ausgangsstoffen und einem Katalysator, wenn die chemischen Akteure getrennt in zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten gelöst sind. Dabei wird ein Teil des Reaktionsmediums am Boden des Kessels abgezweigt und am Deckel mit hohem Druck durch eine Düse zurück in das Gefäß gepresst. So bildet die eine Flüssigkeit in der anderen viele kleine Tröpfchen.



die Alternativen, die preiswertere Metalle wie Mangan, Eisen oder Nickel enthalten. „Wenn das bedeutet, dass in einem industriellen Prozess nur fünf Prozent weniger Rohstoffe eingesetzt werden müssen, überwiegt dieser Kostenvorteil oft den eines preiswerteren Metalls im Katalysator“, so Walter Leitner. Und noch eine Eigenschaft sollte den Malus seltener und teurer Edelmetalle in den Katalysatoren wettmachen: Sie werden bei der Reaktion nicht verbraucht – theoretisch.

NANOPARTIKEL IN EINEM MOLEKULAREN TEPPICH

Praktisch nutzen sich Katalysatoren aber ab, etwa weil sich unerwünschte Substanzen als hartnäckige Verunreinigungen an sie anlagern oder weil die oft fragilen Liganden kaputtgehen. Molekulare Katalysatoren, wie sie auch die Mülheimer Forscher untersuchen, lösen sich zudem im Reaktionsmedium – Chemiker sprechen von homogener Katalyse –, sodass sie aufwendig abgetrennt werden müssen, nachdem sie ihren Job gemacht haben.

Deshalb bevorzugt die chemische Industrie meist die heterogene Katalyse: Dabei reagieren flüssige oder gasförmige Ausgangsstoffe an festen Katalysatoren – die Trennung erübrigt sich dann. Allerdings sind die festen Partnervermittler schwieriger systematisch für eine Wunschreaktion zu optimieren. „Wir arbeiten deshalb mit Wissenschaftlern aus

anderen Abteilungen unseres Instituts die fundamentalen Gemeinsamkeiten dieser beiden Gebiete heraus, um damit das Beste aus beiden Welten auszunutzen“, erklärt Leitner.

An der Grenze zwischen den zwei Welten arbeitet Alexis Bordet mit seinem Team. Die Chemiker verwenden nicht einzelne Metallatome in löslichen Katalysatoren, sondern metallische Nanopartikel und ionische Flüssigkeiten. Diese Substanzen bestehen aus zwei geladenen Komponenten, eine davon ein organisches Molekül in Form eines kurzen Fadens. Diese Molekülfäden knüpfen die Mülheimer Wissenschaftler chemisch an ein Material wie etwa Siliciumdioxid. So entsteht ein geladener molekularer Teppich, der die metallischen Nanoteilchen anzieht wie Velours den Staub. Die Reaktionspartner strömen dann über den metalldurchsetzten chemischen Flor und werden dabei unversehens verkuppelt.

Die molekularen Teppichfasern leisten dabei mehr, als nur die Nanoteilchen festzuhalten. „Die ionischen Flüssigkeiten interagieren stark mit den Nanopartikeln und können dabei selbst katalytisch wirken“, erklärt Alexis Bordet. „Das nutzen wir aus, um die beiden Komponenten zu maßgeschneiderten Katalysatoren zu kombinieren, mit denen wir Wasserstoff sehr selektiv auf Stoffe aus Biomasse oder direkt auf CO₂ übertragen können.“

Während Alexis Bordet das Katalysator-Recycling mit seinem Katalysator-

Teppich umgeht, sucht Andreas Vorholt reaktionstechnische Lösungen, um der Industrie den Einsatz von gelösten molekularen Katalysatoren, die sich im Forschungslabor bewährt haben, zu erleichtern. Der Chemiker, der am Mülheimer Institut ebenfalls eine Forschungsgruppe leitet, hat auch Betriebswirtschaft studiert und schon als Berater der Industrie gearbeitet. Doch nicht erst in dieser Zeit ist ihm klar geworden: „Es gibt eine große Lücke zwischen dem, was die akademische Forschung ermöglicht, und dem, was die Industrie dann umsetzt. Wir möchten deshalb praxisrelevante Daten bereitstellen, damit die Industrie sagt: Das ist wirklich gut. Warum sollen wir das nicht auch mal ausprobieren.“

ERST GUT GEMISCHT, DANN PERFEKT GETRENNT

Um das zu erreichen, setzt Andreas Vorholt auf Reaktionen in Gemischen aus Flüssigkeiten, die sich wie Öl und Essig einer Salatsauce nicht miteinander verbinden. Der Katalysator befindet sich dann etwa in einer organischen Flüssigkeit, während sich das Produkt in einer wässrigen Lösung sammelt – oder umgekehrt. Bei diesem Konzept müssen Chemiker allerdings ein Dilemma lösen: Während der Reaktion sollen sich alle Komponenten – im Fall von CO₂ und Wasserstoff sind auch noch gasförmige Ausgangsstoffe beteiligt – möglichst gut mischen. Anschließend sol-



Oben Destillierte Ideen: Sheetal Sisodiya, Walter Leitner, Christophe Werlé und Christina Erken (von links) besprechen neue Experimente, in denen sich CO₂ nutzen lässt.

Unten Künftig klimafreundlicher: Das Treibhausgas lässt sich als Rohstoff für Schaumstoffe nutzen.



len der Katalysator und das Produkt aber strikt getrennte Wege gehen. „Es ist wie im richtigen Leben: Man will immer genau das, was man nicht hat“, sagt Vorholt. Denn eine Rezeptur, in der sich die Reaktionspartner vollständig in der Lösung des Katalysators befinden, das Produkt dann aber komplett in die andere Flüssigkeit wandert, ist schwer zu finden.

Ein Ausweg aus der misslichen Lage bietet sich, wenn Ausgangsstoffe und Katalysator zwar in den beiden Flüssigkeiten getrennt vorliegen, sich die eine Flüssigkeit aber in Form möglichst kleiner Tropfen in der anderen verteilt. Den künftigen Partnern bietet sich dann eine große Kontaktfläche, an der sie sich mit dem Katalysator zur Reaktion treffen können. Praktisch setzt Andreas Vorholts Team dieses Konzept mit einem Düsen-Umlaufreaktor um: Darin wird am Boden des Reaktionsgefäßes ein Teil des Cocktails abgezweigt und am Deckel durch eine Düse wieder hineingepresst. „So bilden sich feine

Tröpfchen, und die Reaktion läuft viel schneller ab als in konventionellen Reaktoren, obwohl der Katalysator am Ende vom Produkt perfekt getrennt vorliegt“, erläutert Vorholt.

Um das Geschehen in ihren Reaktoren besser zu verstehen und beeinflussen zu können, errichten die Chemiker labortaugliche Kopien von Industrieanlagen und bauen dabei zahlreiche Analyseinstrumente ein. „Wir integrieren eine Messstrecke für eine Online-Überwachung. Denn wie cool wäre das denn, wenn ich wüsste, der Katalysator macht jetzt nicht das, was er soll, und ich dann gegensteuern könnte“, schwärmt Vorholt.

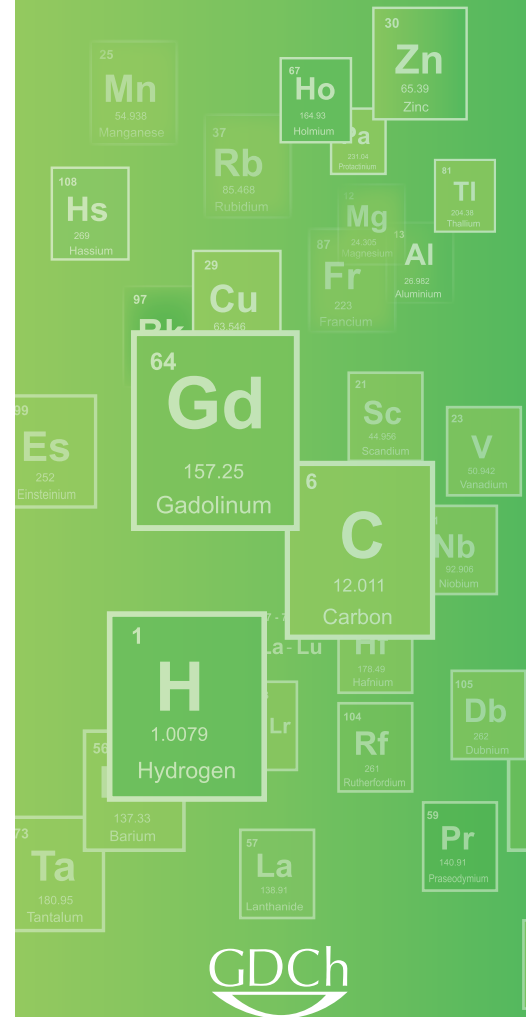
CO₂ IN EINEM POLYOL FÜR MATRATZEN UND SPORTBÖDEN

Dass sich Katalysatoren und chemische Prozesse tatsächlich darauf trimmen lassen, CO₂ auch industriell umzusetzen, belegt ein aktuelles Beispiel. Im CAT, einem Katalysezentrum von Leitners Gruppe an der RWTH Aachen und des Chemieunternehmens Covestro, haben Forscher die Entwicklung eines Verfahrens ermöglicht, mit dem sich CO₂ in ein Polyol – eine wichtige Komponente von Schaum- und Klebstoffen – einbauen lässt.

Das CO₂ dafür zapft das Unternehmen aus anderen Chemieprozessen ab, wo es als Nebenprodukt anfällt. Es ersetzt damit einen Teil des Ausgangsstoffs für die Polyolherstellung, der bislang ausschließlich aus Erdöl gewonnen wurde. Inzwischen produziert Covestro bereits erste Polyole mit bis zu 20 Prozent CO₂-Gehalt in der Größenordnung von einigen Tausend Tonnen. Damit schont das Verfahren Ressourcen und verringert die CO₂-Emissionen entsprechend, wie André Bardow, Professor an der RWTH Aachen, in umfangreichen Analysen der Ökobilanz nachgewiesen hat. Aus Schaumstoff, in dessen molekulares Gerüst CO₂ eingebaut ist, werden bereits Matratzen hergestellt. Und in Sportstät-

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

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



ten gibt es auf Basis dieser Materialien schon CO₂-haltige Bodenbeläge.

Die CO₂-Matratzen sind für Walter Leitner ein Modellfall – und damit erst der Anfang. Ob die chemische Industrie das klimaschädliche Gas auch für andere Produkte als Rohstoff nutzen wird, hängt dabei auch von Faktoren ab, auf die er mit seiner Forschung an Katalysatoren keinen Einfluss hat. Wie effizient und kostengünstig sich CO₂ dort abfangen lässt, wo es in großen Mengen entsteht, ist ein solcher Aspekt. Außerdem muss es genügend Strom aus erneuerbaren Quellen geben, um Wasserstoff nachhaltig zu erzeugen, wenn dieser mit CO₂ eine Liaison eingehen soll. Und die Gase müssen dann auch noch dahin gelangen, wo die chemische Industrie sie verarbeitet.

In den Augen von Caroline Gebauer ist noch eine Starthilfe für die CO₂-

basierte Chemieproduktion angezeigt: „Der CO₂-Ausstoß müsste einen viel höheren Preis bekommen, der den Klimaschaden in Rechnung stellt“, sagt die Power-to-X-Referentin des BUND. „Eine Abgabe auf CO₂ würde da sicherlich helfen.“ Walter Leitner sieht auch unabhängig davon durchaus gute Chancen dafür, CO₂ einem Nutzen zuzuführen. „CO₂ mit Wasserstoff umzusetzen, kann heute schon ökologisch und ökonomisch sinnvoll sein, vor allem wenn die bisherigen Prozesse aufwendig und energieintensiv sind“, sagt der Chemiker. Konkurrenzfähiger würden die nachhaltigen Verfahren auf jeden Fall, wenn die wirtschaftliche Bilanz die CO₂-Bilanz einbezüge. „Das wäre neben der chemischen Katalyse dann die ökonomische Katalyse.“ ◀

 mpg.de/podcasts/energie

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Um CO₂ als Rohstoff in der chemischen Industrie einzusetzen, suchen Max-Planck-Forscher nach geeigneten molekularen Katalysatoren und Produktionsverfahren.
- Sie haben bereits chemische Partnervermittler gefunden, die das Treibhausgas mit Wasserstoff zu Methanol und Ameisensäure umsetzen.
- Um zu vermeiden, dass die gelösten Katalysatoren nach der Reaktion von den Produkten aufwendig abgetrennt werden müssen, verwenden die Chemiker etwa metallische Nanoteilchen, die sie mit ionischen Flüssigkeiten auf einem Untergrund fixieren, oder einen Reaktor, in dem der Katalysator und die Produkte in verschiedenen Flüssigkeiten vorliegen.

GLOSSAR

Katalysator: Eine Substanz, die den Energiebedarf für eine chemische Reaktion senkt, sie in eine gewünschte Richtung steuert und eine Umwandlung oft erst möglich macht. Sie wird bei der Reaktion nicht verbraucht. Bei der homogenen Katalyse liegen die Ausgangsstoffe, das Produkt und molekulare Katalysatoren in einer Flüssigkeit gelöst vor. Bei der heterogenen Katalyse strömen flüssige oder gasförmige Ausgangsstoffe über einen festen Katalysator.

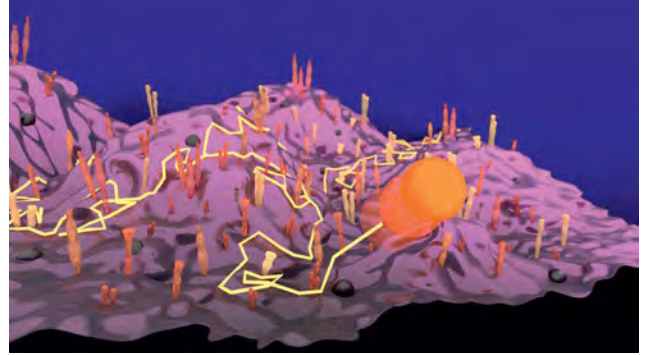
Ligand: Die Bausteine eines molekularen Katalysators gruppieren sich so um das Metallatom – das aktive katalytische Zentrum –, dass sie die Reaktion in eine gewünschte Richtung steuern.

Power-to-X: Eines der Kopernikus-Projekte, mit denen das Bundesforschungsministerium Vorhaben im Zusammenhang mit der Energiewende fördert. Bei Power-to-X wird unter anderem mit Strom aus regenerativen Quellen Wasserstoff erzeugt, der mit CO₂ umgesetzt wird.

3D-Filme aus der Zellmembran

Eine neue Mikroskopiertechnik ermöglicht es, Membranproteinen bei der Arbeit zuzuschauen

Einen neuen Blick auf die Funktionsweise von Zellen hat eine Forschungsgruppe aus Erlangen eröffnet und damit auch neue Möglichkeiten für die Medikamentenentwicklung geschaffen. Vahid Sandoghdar und sein Team vom Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts und vom Max-Planck-Zentrum für Physik und Medizin haben eine Methode namens iSCAT (kurz für interferometric scattering) so weiterentwickelt, dass sie damit Proteine in der Zellmembran filmen können, und zwar in 3D und mit Nanometerauflösung. Dazu markiert das Team die molekularen Akteure mit einzelnen Goldnanopartikeln. Letztere streuen eingestrahlichtes Licht, woraus die Wissenschaftler die Position der Proteine ableiten. Da Membranproteine an zahlreichen zellulären Prozessen beteiligt sind, lässt sich aus ihren Bewegungen und ihrem Verhalten viel über die Funktionsweise von Zellen lernen. Solche Einsichten sind medizinisch relevant, weil ein Großteil der Wirkstoffe an Membranproteinen angreifen. (www.mpg.de/13413156)



Roadmovie mit Membranprotein: Ein mit einem Goldpartikel (oranger Kreis) markiertes Eiweißmolekül lässt sich auf seinem Weg über die Zelloberfläche verfolgen (hellgelbe Linie), weil das Nanoteilchen Licht auf charakteristische Weise streut.

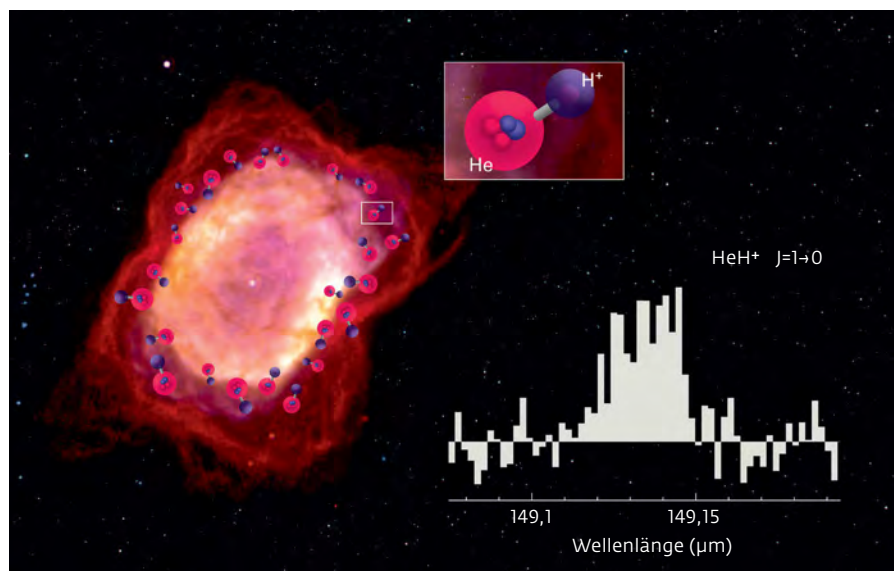
Molekül vom Ursprung des Universums

Astronomen finden Heliumhydrid in einem planetarischen Nebel

Unmittelbar nach dem Urknall vor 13,8 Milliarden Jahren war das Universum unvorstellbar dicht und heiß. Erst nach einer gewissen Zeit ermöglichten fallende Temperaturen die ersten chemischen Reaktionen der entstandenen leichten

Elemente. In diesem Prozess verbanden sich ionisierter Wasserstoff und neutrale Heliumatome zum Heliumhydrid-Ion (HeH^+) – dem ersten Molekül überhaupt. Lange Zeit suchten Forscher im All vergeblich nach dem Stoff. Mit ei-

nem Ferninfrarot-Spektrometer an Bord der fliegenden Sternwarte *Sofia* ist es nun einem internationalen Team unter der Leitung von Rolf Güsten vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie gelungen, dieses Molekül erstmals nachzuweisen, und zwar im planetarischen Nebel NGC 7027. Planetarische Nebel sind Gashüllen, die von sonnenähnlichen Sternen in der letzten Phase ihres Lebens ausgestoßen werden. Im Zentrum sitzt ein ausgebrannter Weißer Zwerg mit einer Oberflächentemperatur von mehr als 100 000 Grad; er erzeugt energiereiche Strahlung, die Ionisationsfronten in die ausgestoßene Hülle treibt. Genau dort sollte sich nach den Modellrechnungen das HeH^+ -Molekül ausbilden – und die Astronomen wurden tatsächlich fündig. (www.mpg.de/13364729)



Molekül vom Anfang: Das Spektrum des Heliumhydrid-Ions HeH^+ , beobachtet an Bord des Flugzeug-Observatoriums *Sofia* im planetarischen Nebel NGC 7027. Das Hintergrundbild wurde mit dem *Hubble*-Teleskop erzeugt; deutlich sichtbar ist die scharfe Übergangsregion zwischen dem heißen Gas (weißlich-gelb) und der kühleren Hülle (rot). Dort entsteht HeH^+ .

Ernährung beeinflusste Entwicklung von Sprachen

Veränderte Essgewohnheiten begünstigten die Entstehung neuer Laute

Das Lautinventar menschlicher Sprache ist äußerst vielfältig und umfasst häufige Laute wie „m“ und „a“ ebenso wie seltene Klicklaute. Allgemein wird angenommen, dass sich das Lautspektrum mit der Entstehung des Homo sapiens vor ungefähr 300 000 Jahren stabilisierte. Ein internationales Forschungsteam unter Beteiligung der Max-Planck-Institute für Menschheitsgeschichte und für Psycholinguistik hat die Evolution der gesprochenen Sprache nun in neues Licht gerückt. Die Studie erbringt den Nachweis, dass sich Labiodentale wie „f“ und „w“, die heute in zahlreichen Sprachen vorkommen, erst in den vergangenen 2000 Jahren stark ausgebreitet haben – als Folge einer neuen Zahnstellung. Frühere Menschen hatten, um harte, zähe Nahrung zu kauen, im Erwachsenenalter einen sogenannten Kopfbiss, bei dem die Schneidezähne Kante auf Kante stoßen. Mit der zunehmenden Verbreitung weicherer Nahrung zum Ende der Steinzeit setzte sich jedoch eine Gebissform durch, bei der die oberen Schneidezähne leicht über die unteren hinausragen. (www.mpg.de/12827766)

Kluft zwischen Arm und Reich in der Lebenserwartung wächst

Einkommen und soziale Situation wirken sich zunehmend stärker aus

Männer, die eine kleine Rente bekommen, sterben im Schnitt fünf Jahre früher als sehr gut situierte Rentner. Zu diesen Ergebnissen kommen Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für demografische Forschung in ihrer Analyse von Daten der Deutschen Rentenversicherung. Zwar hat die Lebenserwartung von 1997 bis 2016 in allen Einkommensschichten zugenommen. Doch in Westdeutschland wuchs sie bei den untersten 20 Prozent mit 1,8 Jahren nur halb so stark wie in der obersten Einkommensgruppe. Im Osten liegt das Plus in der untersten Gruppe bei drei Jahren, in der obersten bei 4,7 Jahren. Zusätzlich konnte ein Teil der älteren Ostdeutschen nach der Wiedervereinigung kaum Rentenpunkte ansammeln, da sie arbeitslos wurden oder nur geringfügig beschäftigt waren. Dadurch sank das Rentenniveau im Osten nach 1997 deutlich. Hauptautor Georg Wenau weist darauf hin, dass die Rentenhöhe nicht als Ursache für die Lebenserwartung interpretiert werden sollte. Eine kleine Rente resultiert oft aus schlecht bezahlten Jobs und Zeiten der Arbeitslosigkeit. Zudem korreliert das Einkommen stark mit dem Gesundheitsverhalten und dem Bildungsniveau. (www.mpg.de/13305168)

Foto: Dongju Zhang, Lanzhou University

Auf der Spur der Denisovaner

Als Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig 2010 einen winzigen Fingerknochen aus der Denisova-Höhle in Russland analysierten, stießen sie auf eine wissenschaftliche Sensation: Das darin enthaltene Erbgut unterschied sich von dem des modernen Menschen und des Neandertalers. Der Knochen musste folglich einer bis dahin unbekannt Menschenform gehören. Die Denisovaner genannten Urmenschen haben sich mit modernen Menschen vermischt, denn im Genom von Asiaten, Australiern und Melanesiern finden sich bis heute Spuren ihrer DNA. Eine Analyse des Erbguts von heute lebenden Menschen aus Indonesien und Neuguinea hat nun ergeben, dass nicht nur eine, sondern zwei verschiedene Denisovaner-Linien DNA an die Vorfahren der heute auf Papua-Neuguinea lebenden Menschen weitergegeben haben. Die beiden unterscheiden sich so sehr voneinander, dass es sich sogar um getrennte Gruppen von Urmenschen handeln könnte. Denisova-Menschen könnten sogar bis vor etwa 30 000 Jahren in der Gegend gelebt haben. Damit wären sie möglicherweise eine der letzten überlebenden Urmenschengruppen.

Die Denisovaner müssen also einst weit verbreitet gewesen sein, Fossilien der geheimnisvollen Urmenschen sind bisher allerdings rar. Nach dem Knochen aus der namensgebenden Höhle in Russland haben Forscher des Leipziger Max-Planck-Instituts nun ein weiteres Fossil einem Denisovaner zugeordnet: einen Unterkiefer aus einer Höhle in Tibet. Der Urmensch lebte vor mindestens 160 000 Jahren. Der Fundort des Kiefers in mehr als 3000 Meter Höhe zeigt, dass sich die Denisovaner an das Leben in dieser sauerstoffarmen Umgebung angepasst hatten, lange bevor der Homo sapiens überhaupt in der Region ankam. Frühere genetische Studien hatten ergeben, dass die Denisovaner den heute im Himalaja lebenden Menschen ein Gen weitergegeben haben, das diesen das Überleben in diesen Höhenlagen erst ermöglicht. (www.mpg.de/13383089, www.mpg.de/13327431)



Unterkieferfragment eines Denisovaners aus der Baishiya-Karsthöhle in Tibet. Im Vergleich zum Homo sapiens besaß der Urmensch kräftige Kiefer mit ungewöhnlich großen Backenzähnen.

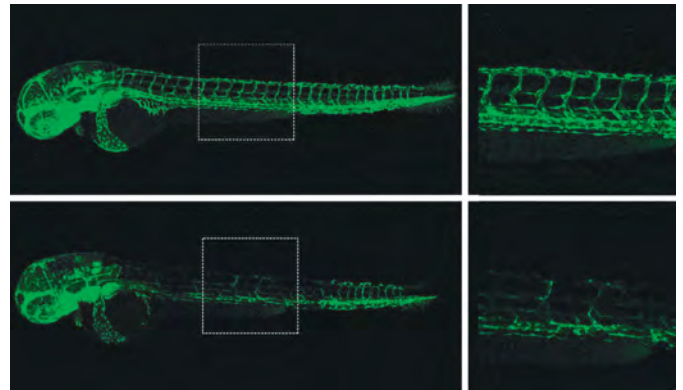
Fehler im Erbgut ohne Folgen

Die Boten-RNA von defekten Genen kann dafür sorgen, dass andere Gene den Ausfall kompensieren

Defekte DNA-Abschnitte sind für eine Reihe ernsthafter Erkrankungen verantwortlich. Wie schwer eine Erkrankung verläuft, kann von Patient zu Patient variieren, denn in manchen Fällen werden verwandte Gene bei einem Defekt aktiver und kompensieren den Ausfall. Eine Schlüsselrolle spielen dabei offenbar Boten-RNA-Moleküle (mRNA), die die Information des mutierten Gens aus dem Zellkern zum Ort der Proteinbildung transportieren. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Herz- und Lungenforschung in Bad Nauheim haben mithilfe genetisch veränderter Zebrafische entdeckt, dass die mRNA eines mutierten Gens das Signal für verwandte Gene ist, die Aufgabe zu übernehmen. Diese bilden den Forschern zufolge dann mehr mRNA und gleichen den Verlust dadurch aus. Bei einer Reihe von Krankheiten könnte das die Ursache dafür sein, dass manche Patienten weniger schwere Symptome aufweisen. Die Forscher wollen deshalb als Nächstes Patienten mit unterschiedlich stark ausgeprägten Krankheitssymptomen

Das Blutgefäßsystem (grün) zwei Tage alter Zebrafisch-Embryonen. Fehlt die mRNA eines defekten Gens, entwickeln sich die Gefäße nicht vollständig (unten).

miteinander vergleichen. Dadurch lassen sich möglicherweise Gene für neue Therapien identifizieren. Die Studie macht darüber hinaus deutlich, dass die Folgen von Manipulationen am Erbgut – wie bei der Genom-Editierung – schwer vorhersehbar sind. (www.mpg.de/13334057)



Sind sich Fische ihrer selbst bewusst?

Die Tiere scheinen ihr Abbild im Spiegel zu erkennen

Schimpansen, Delfine, Krähen und Elstern nehmen ihr Spiegelbild als Abbild des eigenen Körpers wahr. Bislang galt ein solchermaßen bestandener Spiegel-

test als Hinweis darauf, dass diese Arten ein Bewusstsein von sich selbst besitzen. Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie in Konstanz

haben nun entdeckt, dass auch Putzerfische auf ihr Spiegelbild reagieren. Die Fische versuchen, aufgemalte Flecken von ihrem Körper zu entfernen, wenn sie diese im Spiegel sehen. Nicht sichtbare Flecken oder Flecken bei Artgenossen interessieren die Fische hingegen nicht. Das Verhalten der Fische erfüllt zwar alle Kriterien für einen bestandenen Spiegeltest. Ob man aber aus den Ergebnissen folgern kann, dass die Putzerfische ein Bewusstsein für das eigene Selbst besitzen, ist den Forschern zufolge offen. Sie werten das Ergebnis eher als Anlass, den Spiegeltest kritisch zu hinterfragen und zu überlegen, ob er weiterhin als Standardtest für den Selbst-Bewusstseins-Nachweis bei Tieren eingesetzt werden sollte. (www.mpg.de/12699780)



Selbstkritischer Blick: Putzerfische (*Labroides dimidiatus*) leben im Meer und ernähren sich von Parasiten auf der Haut anderer Fische. Sie erkennen im Spiegel, wenn auf ihrem Körper ein Fleck aufgemalt wurde.

Lebensrettende Energiewende

Schadstoffe aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe kosten derzeit jedes Jahr Millionen Menschenleben

Ein schneller Ausstieg aus der fossilen Energiewirtschaft käme nicht nur dem Klima zugute, er würde jährlich auch mehr als drei Millionen vorzeitige Todesfälle durch Luftverschmutzung verhindern. Zu dem Schluss kommt ein internationales Forschungsteam unter Leitung von Jos Lelieveld, Direktor am Max-Planck-Institut für Chemie. Die Wissenschaftler untersuchten, wie die Luftverschmutzung aus unterschiedlichen Quellen die menschliche Gesundheit beeinflusst. Sie verwendeten für ihre Studie neben einem Modell der globalen Atmosphärenchemie auch epidemiologische Daten. Diese ermöglichen Rückschlüsse darauf, zu welchen Krankheiten die jeweilige Belastung durch einen Schadstoff führt und wie das die statistische Lebenserwartung verkürzt. Demnach sind Emissionen aus der Verbrennung von Erdöl, Erdgas und Kohle weltweit für etwa



Windkraft statt Kohle: Eine Abkehr von fossilen Energieträgern würde die Gesundheitsbelastung durch Luftverschmutzung deutlich verringern.

65 Prozent der vorzeitigen Todesfälle durch Luftschadstoffe verantwortlich. Besonders gesundheitsschädlich ist Feinstaub, weil er das Risiko für Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen

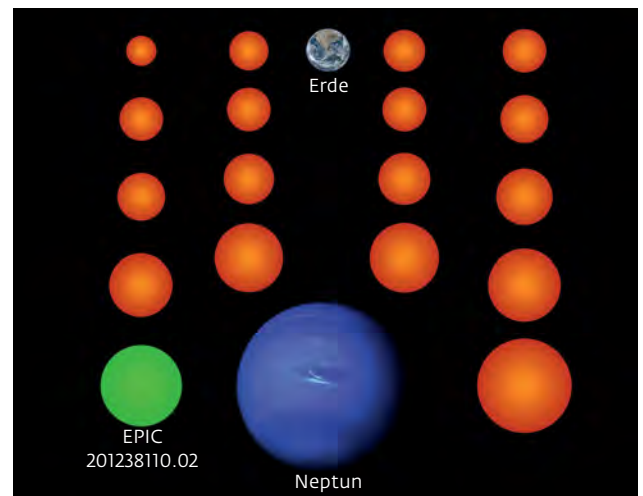
deutlich erhöht. Entsprechend stark könnte die menschliche Gesundheit von einem Umstieg auf erneuerbare Energiequellen profitieren.

(www.mpg.de/13270162)

18 erdgroße Planeten auf einen Schlag

Eine neue Methode spürt kleine Himmelskörper auf, die bisherige Suchkampagnen übersehen haben

Die Astronomen kennen bisher gut 4000 Planeten, die um Sterne außerhalb unseres Sonnensystems kreisen. Von diesen Exoplaneten sind etwa 96 Prozent deutlich größer als unsere Erde. Allerdings dürfte dieser Prozentsatz nicht die wirklichen Verhältnisse im Weltall widerspiegeln, denn große Planeten lassen sich deutlich leichter aufspüren als kleine. Und gerade die kleinen Welten faszinieren, wecken sie doch die Hoffnung, irgendwo im Universum eine „zweite Erde“ zu finden. Tatsächlich haben Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung, der Georg-August-Universität Göttingen und der Sternwarte Sonneberg jetzt 18 erdgroße Exoplaneten entdeckt. Alle diese fremden Welten haben eine Gemeinsamkeit: Sie sind so klein, dass bisherige Suchkampagnen sie übersehen haben. Einer der neuen Exoplaneten zählt sogar zu den kleinsten bisher bekannten, ein weiterer könnte lebensfreundliche Bedingungen aufweisen. Die Forscher werteten einen Teil der Daten des NASA-Weltraumteleskops *Kepler* mit einer von ihnen entwickelten, deutlich empfindlicheren Methode aus. Die Astronomen vermuten, dass sich im gesamten Datensatz der *Kepler*-Mission mit diesem neuen Verfahren noch mehr als 100 relativ kleine Exoplaneten aufspüren lassen. (www.mpg.de/13502471)



Planetengalerie: Fast alle bisher bekannten Exoplaneten sind größer als die Erde und typischerweise so groß wie der Gasplanet Neptun. Die 18 neu entdeckten Planeten (hier orange und grün) hingegen sind deutlich kleiner; auf EPIC 201238110.02 könnte es flüssiges Wasser geben.

Affenjagd sicherte das Überleben im Regenwald

Frühgeschichtliche Siedler in Sri Lanka waren auf das Erlegen von Kleinsäugetern spezialisiert

Tropische Regenwälder gelten für den Menschen eigentlich als ungünstiger Lebensraum: Krankheiten, begrenzte Ressourcen und die darin vorkommenden Tierarten machen den Dschungel

wenig attraktiv für eine Besiedelung. So sind etwa agile Baumaffen und Eichhörnchen viel schwieriger zu fangen und liefern geringere Mengen an Protein als große Tiere in offenen Sa-

vannen. Funde in Sri Lanka belegen jedoch, dass der moderne Mensch bereits vor 45 000 Jahren in den dortigen Wäldern lebte. Ein internationales Team unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Menschheitsgeschichte hat neue Erkenntnisse gewonnen, wie sich Homo sapiens an den Lebensraum anpasste. Demnach spezialisierten sich die frühen Siedler tatsächlich auf die Jagd kleiner agiler Säugetiere wie Affen. Ihre Jagdstrategie war nachhaltig – nur ausgewachsene Tiere wurden erlegt, sodass die Natur nicht übermäßig ausgebeutet wurde. „Dass Menschen diese schwer erreichbare Ressource genutzt haben, ist ein weiteres Beispiel für ihre technologische Anpassungsfähigkeit und ihre Verhaltensflexibilität“, erklärt Michael Petraglia vom Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte, einer der Studienleiter. (www.mpg.de/12742040)

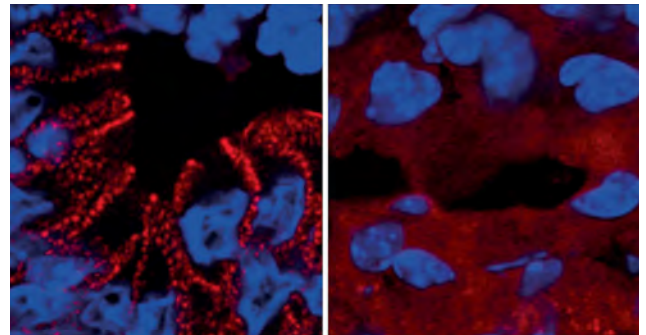


Zu Hause im Regenwald: In der Fa-Hien-Höhle im Dschungel Sri Lankas fanden sich Stein- und Knochenwerkzeuge, die Menschen vor 45 000 Jahren genutzt haben.

Insulin schützt vor Darmkrebs

Signalweg in der Schleimhaut des Verdauungstrakts stärkt die Darmbarriere

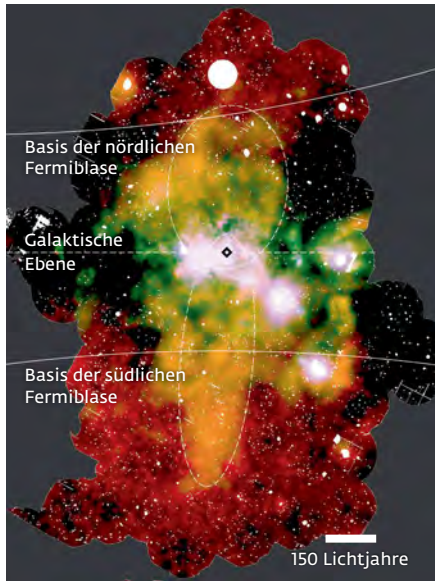
Übergewicht kann dazu führen, dass die Rezeptoren für Insulin nicht mehr auf das Hormon reagieren. Übergewichtige Menschen entwickeln daher häufig eine sogenannte Insulinresistenz. Sie besitzen zudem ein höheres Risiko für Darmkrebs. Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Stoffwechselforschung haben nun herausgefunden, wie die beiden Erkrankungen zusammenhängen: Insulinrezeptoren auf den Zellen der Darmschleimhaut aktivieren Gene, die für die Bildung klettverschlussartiger Verbindungen zwischen den Zellen verantwortlich sind und so die Undurchlässigkeit des Darms aufrechterhalten. Patienten mit Insulinresistenz können solche Verbindungen nach einer Verletzung der Darmwand schlechter neu bilden. In der Folge dringen leichter Bakterien in die Darmwand ein und lösen dort Entzündungen aus, welche die Entstehung von Darmkrebs begünstigen. (www.mpg.de/12791584)



Gesunde Mäuse bilden Verbindungspunkte (leuchtend rot) zwischen den Darmzellen (links). In Mäusen mit einem fehlerhaften Insulinsignalweg fehlen diese (rechts).

Kamine in der Milchstraße

Forscher entdecken ungewöhnliche Strukturen auf einer neuen Röntgenkarte des galaktischen Zentrums



Unsere Milchstraße ist eine eher ruhige Galaxie. Gigantische Energieausbrüche aus ihrem Herzen, in dem ein supermassives schwarzes Loch sitzt, sind selten. Dennoch haben Astronomen schon vor Längerem nahe dem galaktischen Zentrum bipolare Ausbuchtungen nachgewiesen. Diese Flügel oder Lobes zeigen Ausflüsse und reichen bis zu Entfernungen von lediglich etwa 50 Lichtjahren. Zudem kennt man seit Längerem die sogenannten Fermiblasen, die sich jeweils etwa 25 000 Lichtjahre weit über die galaktische Ebene hinaus erstrecken, aber in größerer Entfernung vom Zentrum beginnen. Nun haben Astronomen un-

ter der Leitung des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik im Röntgenlicht eine neue Struktur entdeckt: zwei breite Kamine aus Gas, welche die inneren Bereiche des Zentrums unserer Milchstraße nördlich und südlich der galaktischen Ebene mit Strukturen viel weiter außen verbinden. Sie scheinen von den Flügeln in den inneren Regionen des galaktischen Herzens bis zur Basis der Fermiblasen zu führen. Die Kamine pusteln offenbar kontinuierlich Energie und Masse aus der Umgebung des schwarzen Lochs nach außen und transportieren diese weiter bis zu den Fermiblasen. (www.mpg.de/13250532)

Blick ins Herz unserer Galaxie: Dieses Falschfarbenbild zeigt die Röntgenemission aus der zentralen Region der Milchstraße. Nördlich und südlich der galaktischen Ebene kann man deutlich langgezogene Strukturen erkennen – die kürzlich entdeckten Kamine.

Soziale Unsicherheit stresst auch Schimpansen

Männliche Tiere sind bei instabilen sozialen Beziehungen in ihrer Gruppe weniger aggressiv

Ein hoher sozialer Status bringt in Gruppen lebenden Tierarten viele Vorteile, ist aber auch mit Kosten verbunden. Ein internationales Forschungsteam vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig hat im Taï-Nationalpark an der Elfenbeinküste das Verhalten männlicher Schimpansen beobachtet und Stresshormone im Urin der Tiere gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Hormonwert bei den Männchen in Zeiten sozialer Instabilität und verstärkten Konkurrenzkampfes höher war. Die Tiere waren also gestresster als in stabilen Perioden – und das, obwohl sie sich untereinander in dieser Zeit weniger aggressiv verhielten. Offenbar ist der Stress nicht körperlicher, sondern psychischer Natur: Die Männchen sind durch die soziale Ungewissheit gestresst, wenn sie miteinander um ihre Position in der Gruppe wetteifern. Ähnlich wie beim Menschen scheint für Schimpansen also Unsicherheit in sozialen Beziehungen besonders belastend zu sein. (www.mpg.de/13293982)



Männliche Schimpansen verhalten sich in Zeiten sozialer Instabilität weniger aggressiv, um die Eskalation von Konflikten zu vermeiden und den Gruppenzusammenhalt zu fördern.

Flughunde forsten afrikanische Wälder auf

Mit den durch die Fledertiere verbreiteten Samen könnten jedes Jahr 800 Hektar neuer Wald entstehen

Intakte Ökosysteme erfreuen nicht nur Naturliebhaber, sie nützen Menschen auch finanziell. Wie viel Geld sie jedoch tatsächlich einbringen, ist meist schwer zu beziffern. Nun haben Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Ornithologie in Radolfzell zusammen mit Kollegen aus Schweden und Ghana erstmals den ökologischen und finanziellen Nutzen von Palmenflughunden in Afrika berechnet. Diese Fledermausart fliegt jede Nacht lange Strecken zu ihren Futterplätzen und verbreitet dabei die Samen der verzehrten Früchte. Den Forschern zufolge verbreitet eine Kolonie von 150 000 Tieren in einer einzigen Nacht über 300 000 Samen. Damit könnten pro Jahr allein in Ghana 800 Hektar Wald wiederaufgeforstet werden – und das von einer einzigen Kolonie. Die Zahl der in Afrika lebenden Palmenflughunde geht jedoch immer weiter zurück. Die Tiere sind durch Jagd und die Abholzung großer Bäume bedroht. Von einem besseren Schutz würden sowohl Wälder als auch Menschen profitieren. (www.mpg.de/13271179)



Palmenflughunde lieben Früchte über alles.

Die Wurzeln der Apfelbäume

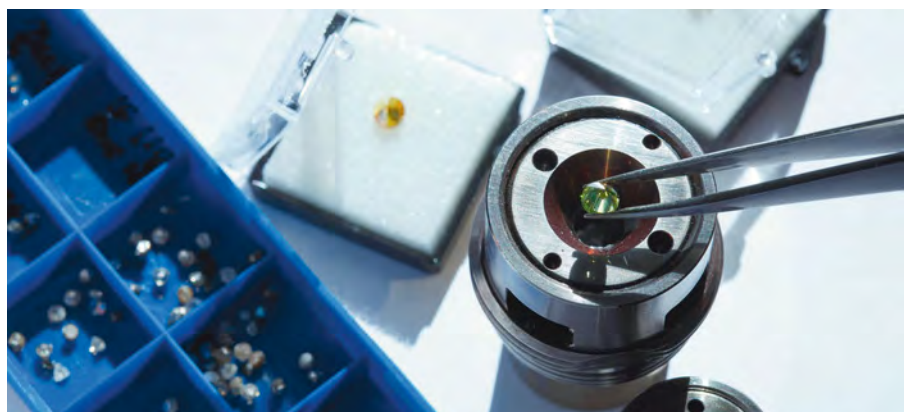
Die Geschichte des Apfels ist eng mit der des Menschen verbunden. Doch vermutlich hat nicht erst der Mensch den Apfel groß gemacht. Wie Robert Spengler vom Jenaer Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in einer neuen Studie darlegt, zeigen fossile und genetische Belege, dass Apfelbäume bereits Millionen Jahre vor ihrer Domestizierung recht große, fleischige und süße Früchte entwickelten. Diese waren eine attraktive Nahrung für große Säugetiere, die zur sogenannten Megafauna gehörten und die Äpfel verbreiteten. Zum Ende der letzten Eiszeit starben die meisten Arten der Megafauna allerdings aus. In der Folge wurden die Wildapfelbestände voneinander isoliert, bis der Mensch begann, die Früchte zu transportieren, insbesondere entlang der Seidenstraße. So kamen die Abstammungslinien wieder in Kontakt miteinander, und es entstanden Hybridsorten, die noch größere Früchte trugen. Durch Veredelung und das Pflanzen von Stecklingen der beliebtesten Bäume verstärkten Menschen diese Eigenschaft weiter und legten so die Basis für die heutige Vielfalt an Äpfeln. (www.mpg.de/13511941)

Ein Sprung Richtung Supraleitung bei Raumtemperatur

Weniger Kraftwerke, weniger Treibhausgase und niedrigere Kosten: Wenn Wissenschaftler Supraleitung bei Raumtemperatur entdecken würden, könnten enorme Strommengen eingespart werden. Denn Supraleiter transportieren Strom ohne Verluste. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz ist diesem Ziel einen Schritt näher gekommen. Die Forscher um Mikhail Eremets synthetisierten Lanthanhydrid. Diese wasserstoffreiche Verbindung mit dem metallischen Lanthan verliert ihren elektrischen Widerstand

bei minus 23 Grad Celsius und unter einem Druck von 1,7 Megabar, also dem 1,7-Millionenfachen des Atmosphärendrucks. Bisher lag der Rekord für die Hochtemperatursupraleitung bei minus 70 Grad Celsius; er wurde seit 2015 von Schwefelwasserstoff gehalten, der dabei ebenfalls sehr hohem Druck ausgesetzt werden muss. (www.mpg.de/13502314)

Macht richtig Druck: In einer nicht einmal faustgroßen Stempelzelle lassen sich zwischen zwei konisch geschliffenen Diamanten mehr als eine Million Bar erzeugen. Dadurch wird Lanthanhydrid bei relativ hohen Temperaturen supraleitend.

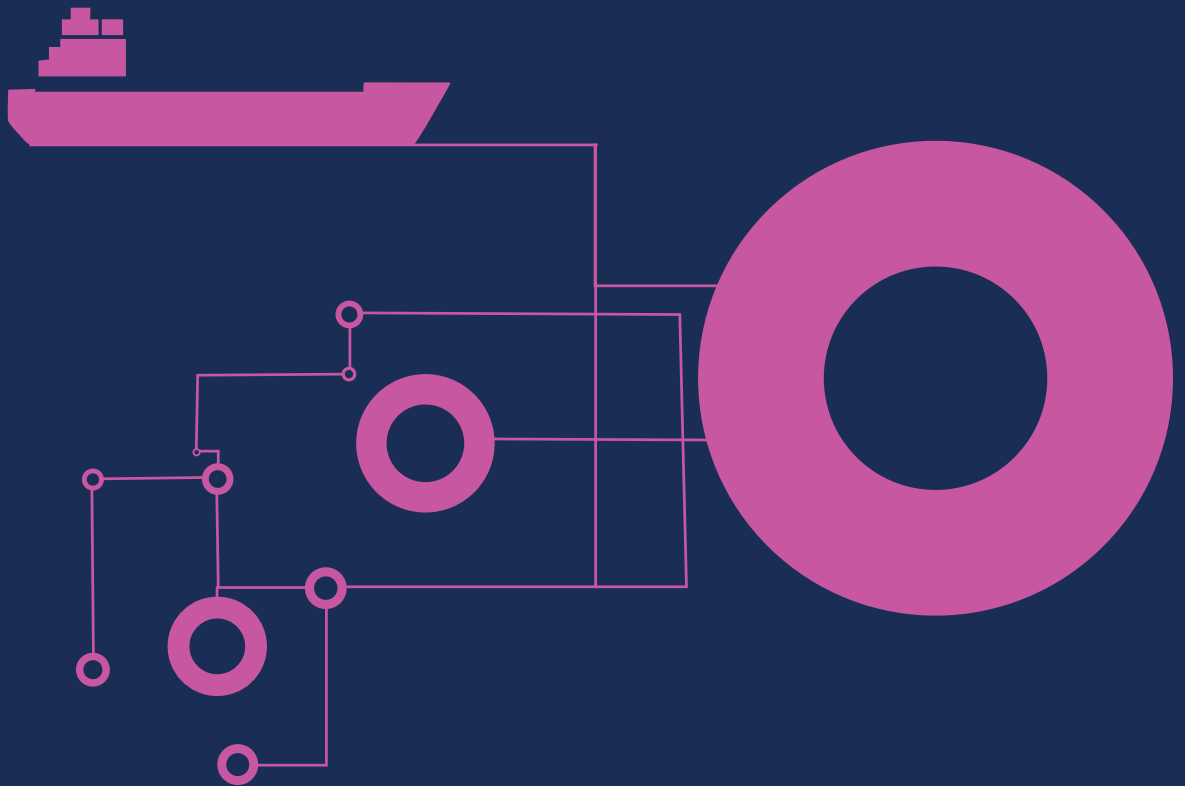


Künstliche Intelligenz

Die Mitmach-Ausstellung
auf dem Frachtschiff

MS Wissenschaft

Künstliche Intelligenz (KI) – was ist das eigentlich genau?
Wie lernen Menschen und wie lernen Maschinen?
Wo bringt KI uns im Alltag Vorteile und welche Risiken gibt es?
Darum geht es 2019 in der Ausstellung auf der MS Wissenschaft.



Mai bis Oktober 2019 | Tour durch 27 Städte
Eintritt frei!

www.wissenschaftsjahr.de | www.ms-wissenschaft.de

Wissenschaftsjahr 2019

**KÜNSTLICHE
INTELLIGENZ**

Massemonster im Blick: Das Bild ist der erste direkte visuelle Nachweis eines schwarzen Lochs. Dieses besonders massereiche Exemplar steckt im Zentrum der gewaltigen Galaxie Messier 87 und wurde mit dem Event Horizon Telescope (EHT) aufgenommen, einem Netzwerk von acht bodengebundenen, über den Globus verteilten Radioteleskopen.

Ein schwarzes Loch im Porträt

Schwarze Löcher verschlucken alles Licht und sind daher unsichtbar. Was plausibel klingt, ist in der Praxis zum Glück für die Astronomen doch ein wenig anders. Denn diese Objekte sind von leuchtenden Gasscheiben umgeben und heben sich daher vom dunklen Hintergrund ab, ähnlich wie eine schwarze Katze auf einem weißen Sofa. Und so ist es mit dem Event Horizon Telescope jetzt erstmals gelungen, ein schwarzes Loch zu fotografieren. An der Beobachtung beteiligt waren auch Forschende des **Max-Planck-Instituts für Radioastronomie** in Bonn und des **Instituts für Radioastronomie im Millimeterbereich (IRAM)** im französischen Grenoble.



TEXT **HELMUT HORNING**

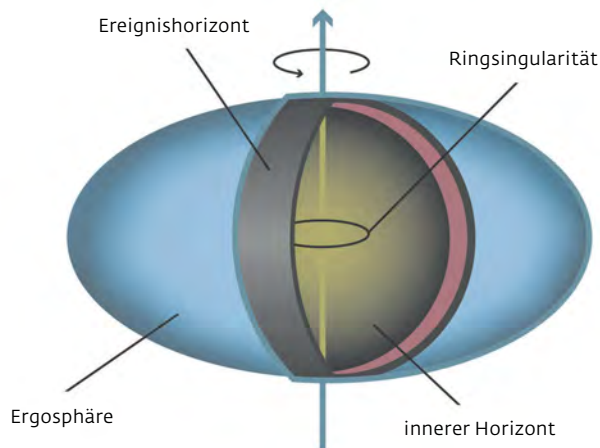
Im Frühjahr 2017 verlinkten die Wissenschaftler zum ersten Mal acht Teleskope auf einer Hälfte des Globus und bildeten so ein virtuelles Teleskop, dessen Öffnung nahezu dem Durchmesser der Erde entsprach. Very-Long-Baseline-Interferometrie (VLBI) heißt diese Technik, in der die Signale der Einzelantennen gleichsam überlagert werden. Diese Synchronisation geschieht mithilfe von hochpräzisen Atomuhren auf die milliardstel Sekunde genau. Dabei lässt

sich eine extreme Winkelauflösung von weniger als 20 Mikrobogensekunden erreichen. Hätten unsere Augen ein derartiges Leistungsvermögen, könnten wir die einzelnen Moleküle in unserer Hand sehen.

DIE MESSDATEN WERDEN IM SUPERCOMPUTER AUSGEWERTET

Zum Verbund dieses sogenannten Event Horizon Telescope (EHT) gehörten unter anderem der 30-Meter-Spiegel von

IRAM in Spanien sowie das APEX-Teleskop in Chile, an dem das Max-Planck-Institut für Radioastronomie beteiligt ist. Insgesamt haben die Teleskope allein bei den Beobachtungen im Jahr 2017 etwa vier Petabytes an Daten aufgenommen – eine solch große Menge, dass der Transport auf dem Postweg tatsächlich schneller und effektiver war als das Senden der Daten per Internet. Die Messdaten wurden am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in den USA sowie am Max-Planck-Institut



Links Hinter dem Horizont: Die Grafik zeigt ein rotierendes schwarzes Loch. Die Ergosphäre bezeichnet jenen Bereich, in dem jedes beliebige Objekt mitrotieren muss. Der Ereignishorizont ist so etwas wie die Oberfläche des schwarzen Lochs; was dahinter verschwindet, ist im wahrsten Sinne aus der Welt.

Rechte Seite Antenne fürs All: Die 30-Meter-Schüssel von IRAM ist das empfindlichste Einzelteleskop in dem weltumspannenden Verbund des Event Horizon Telescope.

für Radioastronomie mit Supercomputern, sogenannten Korrelatoren, kalibriert und ausgewertet.

„Die Ergebnisse geben uns zum ersten Mal einen klaren Blick auf ein supermassives schwarzes Loch, und sie markieren einen wichtigen Meilenstein für unser Verständnis der fundamentalen Prozesse, welche die Bildung und die Entwicklung von Galaxien im Universum bestimmen“, sagt Anton Zensus, Direktor am Bonner Max-Planck-Institut und Vorsitzender des EHT-Kollaborationsrats. Es sei bemerkenswert, dass in diesem Projekt astronomische Beobachtungen und theoretische Interpretation schneller als erwartet zum erhofften Resultat geführt hätten.

Nach den Worten von IRAM-Direktor Karl Schuster basierte der Erfolg auf einer „jahrzehntelangen europäischen Fachkompetenz“ in der Millimeterastronomie: „Schon in den 1990er-Jahren haben das Max-Planck-Institut für Radioastronomie und unser Institut mit seinen beiden Observatorien technisch und wissenschaftlich gezeigt, dass wir mit hochauflösenden Radiobeobach-

tungen eine einzigartige Methode besitzen, die unmittelbare Umgebung von supermassiven schwarzen Löchern zu analysieren.“

IRAM als eine von der Max-Planck-Gesellschaft mitfinanzierte Einrichtung nahm mit dem 30-Meter-Teleskop an der Kampagne aktiv teil. In 2800 Metern Höhe auf dem Berg Pico Veleta in der spanischen Sierra Nevada gelegen, ist es das empfindlichste Einzelteleskop des EHT-Verbundes. „Die Oberfläche unserer Antenne ist mit einer Genauigkeit justiert, die der Feinheit eines menschlichen Haares entspricht“, sagt der Astronom Pablo Torne.

IDEALE WETTERBEDINGUNGEN UND FUNKTIONIERENDE TECHNIK

An vier Tagen im April 2017 hatten Torne und seine IRAM-Kollegen ihr Teleskop im Gleichtakt mit den über den Globus verteilten anderen EHT-Stationen das erste Mal auf das Zentrum der Galaxie M 87 und ihr gigantisches schwarzes Loch gerichtet. „Wir hätten uns keine besseren Wetterbedingungen für die Jahreszeit wünschen können. Vor

allem aber hat die Technik am Observatorium von der hochpräzisen Atomuhr über die Empfangssysteme bis zu den Datenrekordern perfekt funktioniert“, sagt Torne. Insgesamt seien bei diesen Beobachtungen allein an der 30-Meter-Antenne mehr als 500 Terabytes an Daten aufgenommen worden.

Das Herz der außergewöhnlich massereichen Galaxie M 87 besitzt zwei spezielle Eigenschaften, die es zu einem geeigneten Kandidaten für das Projekt machen: Es ist zum einen dank seiner ungewöhnlichen Größe und zum anderen wegen seiner relativen Nähe zur Erde gut zu sehen und damit ein perfektes Studienobjekt für Wissenschaftler, die mit dem weltumspannenden Teleskopverbund nun endlich ein Instrument besitzen, um ein solch exotisches Objekt direkt ins Visier zu nehmen.

Die Regionen um supermassive schwarze Löcher unterliegen den extremsten Bedingungen, die wir im Weltall kennen. Schwarze Löcher sind faszinierende kosmische Objekte, die eine unglaubliche Gesamtmasse innerhalb eines winzigen Raumbereichs umfassen. Ihre Masse und damit ihre Anzie-



» Der Ereignishorizont selbst ist auf dem Bild nicht zu sehen, er ist kleiner und liegt innerhalb des dunklen Bereichs.

hungskraft sind so groß, dass selbst Licht ihnen nicht entkommen kann. Daher bleiben sie schwarz – und es ist unmöglich, sie direkt wahrzunehmen.

Wer diese kosmischen Schwarzkraftfallen tatsächlich sehen will, muss ihren „Schatten“ abbilden. Dieser entsteht durch die extrem starke Beugung des Lichts – und zwar kurz bevor es unwiderruflich im schwarzen Loch verschwindet. Äußerst präzise Radio- beobachtungen im Bereich von Millimeterwellen erlauben es den Astronomen, ungestört von dichten Staub- und Gaswolken bis an die Ränder von schwarzen Löchern vorzudringen.

Das jetzt veröffentlichte Bild wurde bei 1,3 Millimeter Wellenlänge (entsprechend einer Frequenz von 230 Gigahertz) gewonnen und zeigt klar eine ringförmige Struktur mit einer dunklen Zentralregion – eben den Schatten des schwarzen Lochs. Um dieses sehr

massereiche und kompakte Objekt bewegt sich mit hohen Geschwindigkeiten ein heißes Gasplasma. Die ringförmige Struktur auf dem Bild ist nichts anderes als die stark erhitzte Materie um das Massemonster, deren Licht von diesem wie durch eine Linse umgelenkt und verstärkt wird. Nach einer rund 55 Millionen Lichtjahre langen Reise traf es auf die Teleskope des EHT-Verbundes. Die unterschiedliche Helligkeit des Rings liegt an einem relativistischen Effekt: Da das Loch rotiert, erscheint Licht, das auf uns zukommt, heller als solches, das sich von uns entfernt. Der Ereignishorizont selbst ist auf dem Bild nicht zu sehen, er ist kleiner und liegt innerhalb des dunklen Bereichs.

Der Ursprungsort, M 87, ist eine elliptische Riesengalaxie nahe dem Zentrum des Virgo-Galaxienhaufens. Der französische Astronom Charles

Messier trug im Jahr 1781 das Objekt unter der Nummer 87 in seinen Katalog ein. Die Galaxie ist auch als starke Radioquelle namens Virgo A bekannt und sehr aktiv. Aus ihrem Kern schießt ein mindestens 5000 Lichtjahre langer „Jet“ – Materie, die in der Akkretions- scheinbe des schwarzen Lochs im Zentrum beschleunigt wird und in Form eines stark gebündelten Strahls senkrecht zu dieser Scheibe mit hoher Geschwindigkeit ausströmt.

EINBLICK IN DIE ZENTRALE MASCHINERIE EINER GALAXIE

Der Schatten verrät den Forschenden eine Menge über die Natur der zentralen Maschinerie und ermöglicht es ihnen, die enorme Gesamtmasse des schwarzen Lochs von M 87 exakt zu bestimmen. Sie liegt bei 6,5 Milliarden Sonnenmassen. Dieser Wert deckt sich gut mit jenem,



Ein Gigant am Himmel:
Die Riesengalaxie Messier 87 war Ziel der Beobachtungskampagne des Event Horizon Telescope. Der in diesem optischen Bild des Galaxienkerns sichtbare Jet geht offenbar vom supermassiven schwarzen Loch im Zentrum des elliptischen Sternsystems aus.

Für Anton Zensus bedeutet der Erfolg eine Zäsur in der Astronomie. „In Zukunft werden sich Forscher weit über unser Arbeitsgebiet hinaus klar an eine Zeit vor und nach dieser Entdeckung erinnern“, sagt der Max-Planck-Forscher. Seiner Meinung nach werden die Astronomen die galaktischen Zentren besser verstehen und ein vollständiges Bild von Entstehung und Entwicklung aktiver Galaxien gewinnen. Zudem werde man Einsteins allgemeine Relativitätstheorie auf Herz und Nieren testen können. „Denn schwarze Löcher sind ein ideales Labor für Messungen unter starker Schwerkraft.“ ◀

der aus anderen zuvor gewonnenen Beobachtungen abgeleitet wurde.

„Über viele Jahrzehnte konnten wir schwarze Löcher nur indirekt nachweisen“, sagt Michael Kramer, Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie. Dann haben Detektoren vor ein paar Jahren zum ersten Mal Gravitationswellen gemessen und die Auswirkungen von verschmelzenden schwarzen Löchern auf die Raumzeit gleichsam hörbar gemacht. „Nun können wir sie endlich auch sehen und haben die Möglichkeit, diese exotischen Objekte und ihre extreme Raumzeitkrümmung mit all ihrer Faszination auf einzigartige Weise zu untersuchen“, so der Wissenschaftler, einer der Hauptverantwortlichen von *BlackHoleCam*. Dieses Projekt ist Teil des Event Horizon Telescope, dem insgesamt rund 200 Forschende angehören.

DIE BEOBACHTUNG BEDEUTET EINE ZÄSUR IN DER ASTRONOMIE

Die Beobachtungen gehen weiter. Seit Ende 2018 ist auch NOEMA in den französischen Alpen Teil des weltweiten Verbundes. Mit seinen zwölf hochempfindlichen Antennen wird dieses zweite IRAM-Observatorium das leistungsfähigste des EHT auf der nördlichen He-

mispäre sein. „Dank NOEMA werden wir in einen neuen Empfindlichkeitsbereich vorstoßen und damit noch mehr faszinierende Erkenntnisse gewinnen“, sagt IRAM-Direktor Karl Schuster.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Zum ersten Mal ist es Astronomen gelungen, ein schwarzes Loch abzubilden. Es steckt im Zentrum der rund 55 Millionen Lichtjahre entfernten elliptischen Riesengalaxie M 87.
- Für die Beobachtungen im April 2017 wurden mehrere über die Erde verteilte Radioantennen zu einem virtuellen Teleskop zusammengeschaltet.
- Dabei kam die Technik der Very-Long-Baseline-Interferometrie (VLBI) zum Einsatz, bei der die Signale der Einzelantennen gleichsam überlagert werden.
- Zukünftig sollen Bilder von schwarzen Löchern dabei helfen, galaktische Zentren besser zu verstehen, und Einblicke in Entstehung und Entwicklung aktiver Galaxien vermitteln.

GLOSSAR

Akkretionsscheibe: Eine um ein zentrales Objekt – etwa ein schwarzes Loch – rotierende Scheibe, die Materie in Richtung des Zentrums transportiert (akkretiert). Sie kann aus atomarem Gas, aus Plasma (ionisiertes Gas) oder interstellarem Staub bestehen. Zum Zentrum hin steigen Rotationsgeschwindigkeit und Temperatur stark an.

Bogensekunde: Das Leistungsvermögen von Teleskopen wird oftmals in Bogensekunden ausgedrückt als dem Winkel, der gerade noch sichtbar gemacht werden kann. So entspricht eine Bogensekunde dem 3600. Teil eines Grads. Eine Mikrobogensekunde wiederum ist der millionste Teil einer Bogensekunde.

Charles Messier: Der französische Astronom (1730 bis 1817) arbeitete zunächst bei der Marine und später im Bureau des Longitudes. Er entdeckte 20 Kometen und erstellte einen Katalog von 103 astronomischen Objekten wie Gasnebel, Sternhaufen und Galaxien.

„Eine verblüffende Übereinstimmung mit der Theorie“

Max-Planck-Direktor Anton Zensus zur erstmaligen Beobachtung des Schattens eines schwarzen Lochs

Was paradox klingt, ist doch Realität: Schwarze Löcher haben einen Schatten! In der Galaxie Messier 87 konnten Astronomen mit dem Event Horizon Telescope (EHT) jetzt ein solches Phänomen erstmals beobachten. In der ersten Reihe mit dabei war das Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn. Dort leitet Anton Zensus die Abteilung „Very-Long-Baseline Interferometry“. Sie befasst sich mit einer Technik, welche die Entdeckung überhaupt erst ermöglicht hat. Wir sprachen mit Anton Zensus, Vorsitzender des EHT-Kollaborationsrats, wie es zur erfolgreichen Beobachtung kam und wie er die Ergebnisse einschätzt.

Herr Zensus, wie lange läuft das Projekt Event Horizon Telescope schon?

Anton Zensus: Offiziell hat es vor zwei Jahren begonnen. Aber die Vorbereitungen dafür laufen seit einer Dekade. Und wenn man die methodischen Vorarbeiten und die Pionierarbeiten dazuzählt, dann sind es sogar 20 Jahre. Wir haben in dieser Zeit die Qualität unserer Messungen grundlegend verbessert und damit auch schon wichtige wissenschaftliche Fragen zu aktiven Galaxien wie M 87 – etwa zur Natur der gigantischen Materiejets aus deren Zentralbereichen – untersucht. So gesehen, haben wir jetzt den Höhepunkt einer langen Entwicklung erreicht.

Sie sagten, dass das EHT erst seit zwei Jahren beobachtet. Hat Sie der Erfolg nach dieser relativ kurzen Zeit überrascht?

Ja, durchaus! Erstaunlich war aber auch, dass so vieles gleich auf Anhieb geklappt hat. Schließlich besteht das Event Horizon Telescope aus einem Verbund von acht unterschiedlichen Teleskopen. Eines dieser Teleskope, ALMA genannt, befindet sich in 5000 Metern Höhe in der chilenischen Atacama-Wüste und umfasst 66 Einzelanten-

nen. Um diese Anlage in das EHT integrieren zu können, mussten wir alle Einzelantennen per Software zusammenschalten. Dieses „Phasing“ war für uns eine enorme technische Herausforderung und ganz essenziell für das EHT. Zudem haben uns die Wetterbedingungen in die Hände gespielt, die waren gleich zu Beginn recht gut.

Wie muss man sich eine Beobachtung mit acht Teleskopen vorstellen?

Das Stichwort heißt Interferometrie mit sehr langen Basislängen, im Englischen Very-Long-Baseline Interferometry, kurz VLBI, genannt. Dabei richten wir mehrere Radioteleskope, die weit voneinander entfernt stehen, gleichzeitig auf ein und das-

» Wir haben jetzt den Höhepunkt einer langen Entwicklung erreicht.



Anton Zensus, Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie und Vorsitzender des EHT-Kollaborationsrats.

selbe Himmelsobjekt. Die aufgefangenen Signale werden in einem Spezialcomputer – dem Korrelator – zusammengeführt. Auf diese Weise ergibt sich ein virtuelles Teleskop. Dieses liefert eine Bildschärfe, welche der einer einzigen Antenne mit dem Durchmesser des Abstands der voneinander entferntesten Antennen entspricht, im Fall des Event Horizon Telescope sind das etwa 8000 Kilometer. Stellen Sie sich vor: Wären Ihre Augen so scharf wie das EHT, könnten Sie theoretisch von Bonn aus eine Zeitung in New York lesen. Allerdings sieht das EHT kein optisches Licht, sondern Radiostrahlung mit Wellenlängen von etwas mehr als einem Millimeter.

Wie ist Ihr Institut am Event Horizon Telescope beteiligt?

Zum EHT gehört das 12-Meter-Teleskop APEX, das unser Max-Planck-Institut für Radioastronomie zusammen mit der Europäischen Südsternwarte und dem schwedischen Onsala Space Observatory betreibt. Es befindet sich nahe am ALMA-Standort. Die Max-Planck-Gesellschaft ist auch mit der IRAM-30-Meter-Antenne auf dem Pico Veleta in der spanischen Sierra Nevada und zukünftig mit dem NOEMA-Teleskop bei Grenoble beteiligt. Insgesamt arbeiten beim EHT dreizehn Partnerorganisationen aus der ganzen Welt. Schließlich betreibt unser Institut einen Supercomputer, der die Daten kalibriert und auswertet. Tatsächlich fallen gewaltige Datenmengen an, jedes der EHT-Einzelteleskope liefert täglich etwa 350 Terabytes.

Sie wussten, wonach Sie suchen – nach dem Schatten eines schwarzen Lochs. Spielten theoretische Überlegungen eine große Rolle?

Ja, den theoretischen Hintergrund liefert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie von 1915. Ebenfalls vor ungefähr hundert Jahren haben Astronomen zum ersten Mal Jets beobachtet. Das sind Gasströme, die aus den Zentren aktiver Galaxien herausgeschossen und bei enorm hohen Energien erzeugt werden müssen. Seit den 1970er-Jahren vermuten wir, dass dahinter supermassereiche schwarze Löcher stecken. Die

Relativitätstheorie sagt voraus, dass ein massereiches Objekt Licht ablenken kann. Der englische Astronom Arthur Eddington hat dieses Phänomen während einer totalen Sonnenfinsternis gemessen, als er eine kleine Verschiebung der Sternpositionen nahe der Sonnenscheibe beobachtete. Das war übrigens am 29. Mai 1919, also vor hundert Jahren. So schließt sich der Kreis.

Das schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße ist wesentlich näher als jenes in der Galaxie Messier 87. Warum war das EHT trotzdem bei M 87 erfolgreich?

Unsere Milchstraße zielt sich eben, die letzten Geheimnisse preiszugeben (*lacht*). Aber Spaß beiseite, es gibt natürlich handfeste Gründe: Zum einen ist das Herz unserer Milchstraße in einem dichten Nebel aus geladenen Teilchen verborgen. Das führt zu einem Flimmern der Radiostrahlung und damit zu unscharfen Bildern des Milchstraßenzentrums. Aber ich bin zuversichtlich, dass wir dieses Problem auch noch lösen können. Andererseits ist die Galaxie M 87 zwar ungefähr 2000-mal weiter weg, aber das schwarze Loch in ihrem Zentrum auch 1000-mal massereicher als jenes in unserer Milchstraße. Die größere Masse macht die größere Entfernung wett, und der Schatten des schwarzen Lochs in M 87 erscheint uns daher noch etwa halb so groß wie derjenige aus der Schwerkraftfalle in unserer Milchstraße.

Was hat es mit dem Schatten eines schwarzen Lochs auf sich?

Ein schwarzes Loch lenkt das Licht noch weit mehr ab als unsere Sonne, und die Relativitätstheorie sagt voraus, dass man einen Strahlungsring um einen dunklen Flecken beobachten sollte. Eben dort, wo sich das schwarze Loch befindet. Manche nennen diesen dunklen Flecken – etwas salopp – den Schatten des schwarzen Lochs.

Aber woher kommt das Licht, schwarze Löcher sind doch schwarz?

Nach der allgemeinen Relativitätstheorie besitzen schwarze Löcher einen sogenannten Ereignishorizont. Dieser beschreibt

jene Region, innerhalb derer nichts mehr dem schwarzen Loch entkommen kann. Deshalb sollten uns der Ereignishorizont, aber auch der Bereich innerhalb schwarz erscheinen. Der Theorie nach befindet sich, angezogen von der gewaltigen Masse, außerhalb des Ereignishorizonts eine gewaltige Menge an Gas, das in einer strudelartigen Scheibenstruktur mit ungeheurer hohen Geschwindigkeiten herumwirbelt. Dabei heizt sich das Gas auf und beginnt zu leuchten. Zudem setzen relativistische Teilchen – solche, die sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit in einem Magnetfeld bewegen – Synchrotronstrahlung frei. Um ein schwarzes Loch herum „leuchtet“ es also, während das Loch selbst, wie der Name sagt, schwarz erscheint. Diese Schwärze haben wir beobachtet.

Was haben Sie aus dem Schatten herausgelesen?

Wir waren, ehrlich gesagt, verblüfft, wie gut der beobachtete dunkle Fleck mit der aus unseren Computersimulationen vorhergesagten Struktur übereinstimmt. Aus dem Schatten selbst lassen sich etwa die Masse, die Rotation und das Magnetfeld des schwarzen Lochs ableiten. Dazu wurden am Computer 60000 verschiedene Simulationen von schwarzen Löchern vorgenommen und mit den EHT-Ergebnissen verglichen.

Wie wird diese erfolgreiche Beobachtung die Astronomie weiterbringen?

Schwarze Löcher sind ein ideales Labor für Messungen unter starker Schwerkraft. Daher stehen wir am Anfang einer Phase, in der viele neue Erkenntnisse auf uns warten. So werden wir alternative Erklärungen für schwarze Löcher – etwa Bosonen- oder Gravasterne – bald sicher ausschließen können. Wir werden die galaktischen Zentren besser verstehen und ein vollständiges Bild von Entstehung und Entwicklung aktiver Galaxien gewinnen. Und wir werden Pulsare in der Umgebung des schwarzen Lochs in unserer Milchstraße beobachten und damit die allgemeine Relativitätstheorie auf Herz und Nieren testen können.

Das Interview führte Helmut Hornung.

Das Geheimnis der dunklen Körper

Schwarze Löcher bestehen nicht aus Materie, obwohl sie eine große Masse besitzen. Daher ließen sie sich bis vor Kurzem auch nicht direkt beobachten, sondern nur über die Wirkung ihrer Schwerkraft auf die Umgebung: Sie krümmen Raum und Zeit und besitzen eine geradezu unwiderstehliche Anziehung. Mit dem Event Horizon Telescope wurde nun erstmals der Schatten eines schwarzen Lochs aufgespürt. Kaum zu glauben, dass die Idee hinter solchen exotischen Objekten schon mehr als 230 Jahre alt ist.

TEXT HELMUT HORNUNG

Die Wiege der schwarzen Löcher steht im beschaulichen Städtchen Thornhill in der englischen Grafschaft Yorkshire. Dort, neben der mittelalterlichen Kirche, lebte im 18. Jahrhundert John Michell. 26 Jahre lang war er hier Pfarrer und – wie man auf der Inschrift seines Denkmals in der Kirche lesen kann – auch als Gelehrter hoch angesehen. Tatsächlich hatte Michell in Cambridge nicht nur Theologie, Hebräisch und Griechisch studiert, sondern sich auch den Naturwissenschaften gewidmet.

Sein Hauptinteresse galt der Geologie. So behauptete er in einer Abhandlung, die nach dem Erdbeben von Lissabon im Jahr 1755 erschien, dass es unterirdische Wellen gebe, die ein solches Erdbeben verbreiten. Diese Theorie erregte in der wissenschaftlichen Welt einiges Aufsehen, und so wurde John Michell nicht zuletzt deswegen in die Royal Society in London aufgenommen.

Vor dieser renommierten Gesellschaft hielt er im Jahr 1783 einen Vortrag über die Schwerkraft von Sternen. Darin schilderte er in einem Gedankenexperiment, dass das Licht bei genü-

Kosmischer Strudel: Das schwarze Loch Cygnus X-1 verschlingt Materie eines benachbarten blauen Riesensterns und sendet dabei Röntgenstrahlung aus.

gend großer Gravitation die Oberfläche eines sehr massereichen Sterns nicht verlassen würde. Und er folgerte: „Wenn ein solches Objekt in der Natur wirklich existieren sollte, könnte uns sein Licht niemals erreichen.“

Ein gutes Jahrzehnt nach John Michell griff ein anderer Wissenschaftler das Thema auf: Der französische Mathematiker, Physiker und Astronom Pierre-Simon de Laplace beschrieb in



Links Höhere Mathematik: Karl Schwarzschild berechnete 1916 – auf Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie – die Größe und das Verhalten eines nicht rotierenden und nicht elektrisch geladenen statischen schwarzen Lochs.

Rechts Gedankenspiele: Der französische Mathematiker, Physiker und Astronom Pierre-Simon de Laplace beschrieb im Jahr 1796 die Idee schwerer Sterne, von denen Licht nicht entkommen könne.

seinem 1796 erschienenen Werk *Exposition du Système du Monde* die Idee schwerer Sterne, von denen Licht nicht entkommen könne; dieses Licht bestand nach der allgemein akzeptierten Theorie von Isaac Newton aus Korpuskeln, kleinsten Teilchen. Laplace nannte ein solches Objekt *corps obscur*, dunkler Körper.

Die physikalischen Gedankenspiele von John Michell und Pierre-Simon de Laplace fanden allerdings kaum Widerhall und gerieten schnell in Vergessenheit. Erst Albert Einstein ebnete mit seiner allgemeinen Relativitätstheorie diesen „dunklen Körpern“ den Weg in die Wissenschaft – ohne es eigentlich zu wollen. Zwar ließ sich aus seinen im Jahr 1915 veröffentlichten Gleichungen die Existenz punktförmiger Singularitäten herleiten, in denen Materie und Strahlung aus unserer Welt einfach verschwinden.

Doch im Jahr 1939 veröffentlichte Einstein in der Zeitschrift *ANNALS OF MATHEMATICS* einen Artikel, mit dem er beweisen wollte, dass solche schwarzen Löcher unmöglich seien. Dabei hatte der Astronom Karl Schwarzschild schon 1916 – auf Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie – die Größe und das Verhalten eines nicht rotierenden und nicht elektrisch geladenen statischen schwarzen Lochs berechnet. Nach ihm ist der von der Masse eines solchen Ob-

jekts abhängige Radius benannt, innerhalb dessen nichts mehr nach außen dringen kann. Für die Erde würde dieser Radius etwa einen Zentimeter betragen, man müsste sie also auf die Größe einer Kirsche zusammendrücken.

EXAKTE LÖSUNGEN FÜR EINSTEINS FELDGLEICHUNGEN

Schwarzschild hatte in seinem kurzen Leben eine steile Karriere gemacht. Im Jahr 1873 als ältestes von sechs Kindern einer deutsch-jüdischen Familie in Frankfurt geboren, zeigte sich schon früh sein Talent. Als 16-Jähriger veröffentlichte er in einer renommierten Zeitschrift zwei Arbeiten zur Bahnbestimmung von Planeten und Doppelsternen. Später führte ihn seine astronomische Laufbahn über München, Wien und Göttingen nach Potsdam, wo er 1909 Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums wurde. Ein paar Jahre später, mitten im Ersten Weltkrieg – Karl Schwarzschild war Artillerie-Leutnant an der Ostfront in Russland –, fand er die exakten Lösungen für Einsteins Feldgleichungen. Er starb am 11. Mai 1916 an einer Autoimmunerkrankung der Haut.

Das Thema schwarze Löcher fand aber erst einmal nicht den Weg in die Wissenschaft. Überhaupt nahm das Interesse an dem Einstein'schen Gedan-

kengebäude nach dem anfänglichen Hype immer mehr ab. Diese Phase dauerte ungefähr von Mitte der 1920er- bis Mitte der 1950er-Jahre an. Dann erfolgte das, was der Physiker Clifford Will als „Renaissance der allgemeinen Relativitätstheorie“ bezeichnete.

Nun wurde diese wichtig für die Beschreibung von Objekten, mit denen sich zunächst nur die Theoretiker beschäftigten: weiße Zwerge etwa oder Neutronensterne, in denen die Materie in ganz extremen Zuständen vorliegt. Deren unerwartete Eigenschaften ließen sich mithilfe von neuen, der Theorie abgewonnenen Konzepten erklären. So rückten auch die schwarzen Löcher in den Fokus der Aufmerksamkeit. Und Wissenschaftler, die sich mit ihnen beschäftigten, avancierten zu Stars – wie der im Jahr 2018 gestorbene englische Physiker Stephen Hawking.

Anfang der 1970er-Jahre brach mit *Uhuru* eine neue Ära der beobachtenden Astronomie an. Denn der Satellit musterte das Weltall im Bereich der extrem kurzwelligen Röntgenstrahlung. *Uhuru* entdeckte Hunderte von Quellen, meist Neutronensterne. Aber darunter war auch ein besonderes Objekt im Sternbild Schwan. Es erhielt die Bezeichnung Cygnus X-1. Dahinter, so fanden die Forscher heraus, steckt ein blau leuchtender Riesenstern von etwa 30 Sonnenmassen. Ihn umläuft ein un-

» Die Astronomen schlossen, dass in einem Raumbereich von der Größe unseres Planetensystems rund 4,5 Millionen Sonnenmassen konzentriert sind.

sichtbares Objekt von rund 15 Sonnenmassen – offenbar ein schwarzes Loch.

So lässt sich auch die empfangene Röntgenstrahlung erklären: Die Schwerkraft des schwarzen Lochs zieht die Materie des Hauptsterns an. Diese sammelt sich in einer sogenannten Akkretionsscheibe um das Massemonster, strudelt mit unvorstellbar hoher Geschwindigkeit um dieses herum, erhitzt sich aufgrund der Reibung auf einige Millionen Grad – und sendet Röntgenstrahlung aus, bevor sie in dem Raumzeit-Schlund verschwindet.

Cygnus X-1 ist bei Weitem nicht das einzige schwarze Loch, das die Astronomen indirekt nachgewiesen haben. Bis heute kennen sie eine ganze Reihe mit 4 bis 16 Sonnenmassen. Aber es gibt noch ein deutlich schwergewichtigeres. Es sitzt im rund 26 000 Lichtjahre entfernten Herzen der Milchstraße und wurde Ende der 1990er-Jahre aufgespürt. Einer Gruppe um Reinhard Genzel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik gelang im Jahr 2002 eine sensationelle Entdeckung: Am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) beobachteten die Wissenschaftler einen Stern, der sich dem galaktischen Zentrum bis auf eine Entfernung von nur 17 Lichtstunden (gut 18 Milliarden Kilometer) angenähert hatte.

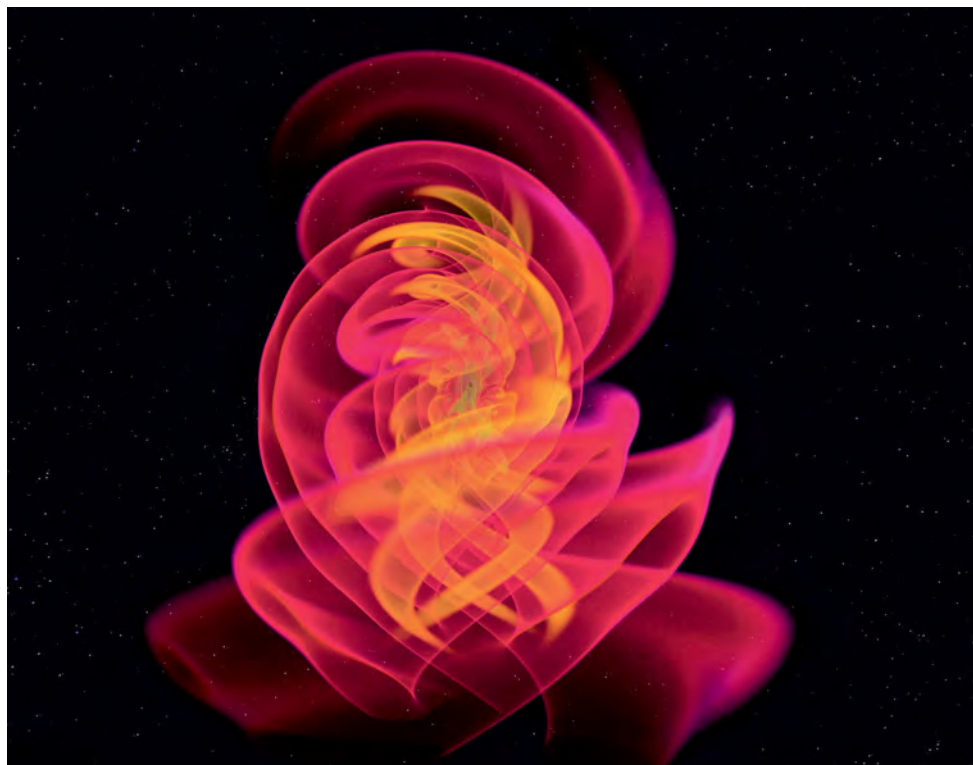
In den Monaten und Jahren darauf konnten sie die Bahnbewegung dieses S2 genannten Sterns verfolgen. Er umläuft das Zentrum der Galaxis (Sagittarius A*) mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 5000 Kilometern pro Sekunde einmal in 15,2 Jahren. Aus der Bewegung von S2 und anderen Sternen

schlossen die Astronomen, dass in einem Raumbereich von der Größe unseres Planetensystems rund 4,5 Millionen Sonnenmassen konzentriert sind. Für eine derartige Dichte gibt es praktisch nur eine plausible Erklärung: ein gigantisches schwarzes Loch.

Unsere Milchstraße ist keine Ausnahme: Die Wissenschaftler glauben, dass in den Zentren der meisten Galaxien solche Massemonster lauern – manche noch viel gewaltiger als das von Sagittarius A*. So etwa steckt in der Riesengalaxie Messier 87 ein schwarzes Loch von ungefähr 6,5 Milliarden Sonnenmassen! Auch dieses rund 55 Millionen Lichtjahre entfernte Sternsystem stand – ebenso wie Sagittarius A* – auf dem Beobachtungsprogramm des Event Horizon Telescope. Und tatsächlich

wurden die Astronomen in der elliptischen Riesengalaxie M 87 fündig: Die am 10. April 2019 veröffentlichte Beobachtung des „Schattens“ gilt als erster direkter Nachweis einer galaktischen Schwerkraftfalle.

Schwarze Löcher machten aber bereits ein paar Jahre zuvor von sich reden: Im September 2015 gingen den Forschern die von Einstein vorausgesagten Gravitationswellen ins Netz; Quelle waren zwei verschmelzende Löcher mit 36 und 29 Sonnenmassen. Die gut 230 Jahre alte Geschichte der schwarzen Löcher ist also noch lange nicht zu Ende. Im Gegenteil: Mit diesen Beobachtungen beginnt eine neue Ära der Astronomie, die Licht ins dunkle Universum bringen soll – und auch die rätselhaften Massemonster erhellen wird. ◀



Erschütterungen der Raumzeit: Im Jahr 2015 haben Astronomen zum ersten Mal Gravitationswellen aufgefangen – hier in einer numerisch-relativistischen Simulation. Tief im All waren zwei schwarze Löcher miteinander verschmolzen.

Volle Kanne!

Tellereisen, Leimruten, Fallgruben – insektenfressende Pflanzen haben sich ungewöhnliche Techniken einfallen lassen, um an zusätzliche Nährstoffe zu gelangen. **Axel Mithöfer** untersucht am **Max-Planck-Institut für chemische Ökologie** in Jena, wie Kannenpflanzen aus Südostasien ihre Opfer anlocken und verdauen.

TEXT CATARINA PIETSCHMANN

Pflanzen, die Tiere fressen – auf so eine Idee muss man erst mal kommen. Doch für die Evolution ist das kein Problem. Die außergewöhnlichen Pflanzen beflügeln Fantasie und Neugier der Menschen schon lange.

Charles Darwin widmete den landläufig als „fleischfressend“ titulierten Pflanzen sogar ein ganzes Buch und schrieb über den Fangmechanismus des Sonnentaus: *„Es ist überraschend, was für kleine Teilchen irgendeiner Substanz (...), wenn sie in tatsächliche Berührung mit der Oberfläche der Drüse gebracht werden, genügen, den Tentakel zum Biegen zu veranlassen. (...) Es ist eine viel merkwürdigere Tatsache, dass, wenn ein Gegenstand wie ein Stückchen Fleisch oder ein Insekt auf die Scheibe des Blattes gelegt wird, sobald die umgebenden Tentakeln beträchtlich eingebogen werden, ihre Drüsen eine verstärkte Menge von Absonderungen ergießen...“*

Der Mensch lässt sich von den Fleischfressern unter den Pflanzen aber

nicht nur faszinieren, er nutzt sie auch ganz profan: In Malaysia zum Beispiel werden die Fallen der Kannenpflanze *Nepenthes* mit Klebreis, Gemüse oder Fleisch gefüllt und gegessen. Auf Borneo werden die alten, verholzten Kannen als Vorratsgefäße für Speisen und Getränke oder zum Dämpfen von Reis verwendet.

FLÜSSIGKEIT MIT HEILWIRKUNG

Die Pflanzen sollen sogar gesundheitsfördernd sein. So behandeln indigene Völker etwa Hautentzündungen und Verdauungsstörungen mit dem Verdauungssaft aus den Kannen.

Auch Axel Mithöfer findet die insektenfressenden Pflanzen ganz praktisch. „Im Sommer stelle ich zwei, drei Sonnentau-Pflänzchen neben den Obstkorb. Probleme mit Fruchtfliegen gibt's dann keine mehr.“

Die tierische Zusatzkost hilft den Pflanzen, auch in nährstoffarmen Lebensräumen auf ihre Kosten zu kommen. Wer eine fleischfressende Pflanze

zu Hause pflegen möchte, sollte sie deshalb nicht düngen. „Wenn sie ihren Nährstoffbedarf über die Wurzeln decken kann, bildet sie weniger Fallen und steckt stattdessen mehr Energie in Blätter für die Fotosynthese“, sagt Mithöfer.

Von allen insektenfressenden Pflanzen ist die Venusfliegenfalle *Dionaea muscipula* mit ihren an Tellereisen erinnernden Fallen die spektakulärste. Die aus Nordamerika stammende Moorpflanze ist die bekannteste aktive Fallenstellerin. Zwar besitzt die Wasserfalle *Aldrovanda*, die früher auch in Deutschland vorkam, einen ganz ähnlichen Fangmechanismus wie die Venusfliegenfalle, da ihre Fangblätter aber nur wenige Millimeter groß sind und die Pflanze unter Wasser wächst, ist sie kaum bekannt. Auch der Sonnentau gehört mit seinen sich um die Beute krümmenden Tentakeln zu den aktiven Fallenstellern.

Die Venusfliegenfalle schnappt ihre Opfer mit einer Geschwindigkeit, die man einer Pflanze eigentlich nicht zutrauen würde. Mithöfer demonstriert

Unter UV-Licht erscheint die Falle einer Kannenpflanze wie ein filigranes Kunstwerk. Insekten werden von Nektar am Kannenrand angelockt und rutschen in den Bauch der Falle. Der Deckel verhindert, dass Regen die Verdauungsflüssigkeit in der Falle zu stark verdünnt.





Rezeptoren für Chitin melden den Kannenpflanzen die Anwesenheit von Beute – die Pflanzen schmecken ihre Nahrung also regelrecht.

den Fangmechanismus im Gewächshaus des Jenaer Max-Planck-Instituts: Mit einem feinen Ästchen streicht er vorsichtig über eine aufgespannte Falle und berührt dabei ein paarmal die Tastaare in deren Innerem. Auf beiden Fangblatthälften sitzen jeweils drei dieser mit bloßem Auge gerade noch sichtbaren Härchen.

ZAPPELN IST TÖDLICH

In einer Zehntelsekunde schnappt die Falle zu. „Wenn die Fliege schlau wäre, würde sie zwei Stunden bewegungslos sitzen bleiben. Denn dann öffnet sich die Falle wieder, und sie könnte flüchten“, erklärt Mithöfer. Aber ruhig sitzen zu bleiben, entspricht nicht dem Fliegennaturell. Und man kann sie ja auch verstehen: Zwischen den Klappen eingezwängt, gerät sie in Panik und zapelt wie wild, um freizukommen.

Jedes Mal, wenn sie dabei ein Tastaar berührt, produzieren die Härchen einen winzigen elektrischen Stromimpuls, ähnlich wie der einer Nervenzelle. „Die Pflanze addiert die Impulse auf und merkt so, ob sie tatsächlich lebende Beute gemacht hat oder nur ein Regentropfen auf ihr gelandet ist“, erklärt Mithöfer. „Zwei, drei Kontakte sind okay. Aber acht, neun oder zehn bedeuten: Ende Gelände!“ Eine Pflanze also, die zählen kann!

Während sich die Fangblätter eng zusammendrücken und das Insekt erdrücken, läuft der Fliegenfalle buchstäblich das Wasser im Mund zusammen: Säure und Verdauungssäfte steigen aus Drüsen in der Falle auf, umspülen die Beute und lösen sie auf. Dieselben Drüsen nehmen dann auf, woran es der hungrigen Pflanze in ihrem nährstoffarmen Lebensraum mangelt: Stickstoff- und Phosphatverbindungen.

Das Festmahl dauert mehrere Tage. Dann klappt die Falle wieder auf und spuckt die „Knochen“ aus – das unverdauliche Chitinskelett der Fliege. In der Natur wäscht der nächste Regenschauer die Reste vom Bankett heraus.

Ganz anders der Sonnentau: Landet ein Insekt auf seinen mit feinen Tentakeln bedeckten Blättern, halten es unzählige Tröpfchen einer klebrigen Flüssigkeit fest. Die Tentakeln am Blattrand bugsieren das Tier zunächst in die Blattmitte, denn hier sitzen besonders viele der Drüsen, die Verdauungssaft produzieren. Dann rollt sich das Blatt ganz gemächlich über der „Mahlzeit“ zusammen, und die Beute wird verdaut.

Die tierische Ernährungsweise hat sich bei Pflanzen gleich mehrfach unabhängig voneinander entwickelt. Die Meinungen reichen von vier bis neun getrennten Entwicklungslinien. Das Erbgut einiger Arten wie des Wasserschlauchs *Utricularia* und des australi-

schen Zwergkrugs *Cephalotus* ist bereits entschlüsselt. In Würzburg analysieren Forscher gerade das Erbgut der Venusfliegenfalle, und Mithöfers Team sitzt an dem der Kannenpflanze *Nepenthes*.

NEUE AUFGABEN FÜR PROTEINE

An den Genen lässt sich ablesen, dass die fleischfressenden Pflanzen trotz unterschiedlicher Entwicklung wichtige Gemeinsamkeiten haben: So nutzen sie alle Enzyme, die die Evolution schon ihren Urahren mit auf den Weg gegeben hat. „Pflanzen sind seit 400 Millionen Jahren Pflanzenfressern und Krankheitserregern wie Pilzen ausgesetzt. Aus diesem Grund haben sie zum Beispiel schon vor langer Zeit Enzyme wie die sogenannten Chitinasen hervorgebracht, welche die Zellwand von Pilzen knacken können“, sagt Axel Mithöfer.

Glücklicherweise besteht der Panzer von Insekten ebenfalls aus Chitin. Fleischfressende Pflanzen machen sich diesen Umstand zunutze und widmen die bereits vorhandenen Werkzeuge einfach um – auf diese Weise sind aus Verteidigungsenzymen Verdauungsssekrete geworden.

Heute brechen sie mit den Chitinasen die Chitinpanzer von Insekten auf, um in deren Innerem an Nährstoffe zu gelangen. An im Insektenkörper enthaltenen Stickstoff und an das Phosphat

Oben links Die Venusfliegenfalle besitzt einen ausgeklügelten Fangmechanismus: Signalhärchen in den zu Klappfallen umfunktionierten Blättern melden der Pflanze, wenn sich ein Insekt in der Falle befindet. Innerhalb von Sekundenbruchteilen klappen die beiden Blatthälften zusammen und halten die Beute fest.

Oben rechts Auf Klebefallen setzen dagegen die verschiedenen Arten des Sonnentaus – hier der Kap-Sonnentau: Was wie süßer Nektar auf roten Blüten im Sonnenlicht glitzert, ist in Wahrheit eine klebrige Flüssigkeit, die Insekten anlocken und festhalten soll.

Unten Alberto Dávila-Lara ist Doktorand in Axel Mithöfers Forschungsgruppe. Hier sammelt er den Nektar vom Rand einer Kanne.



kommen die Pflanzen dank Proteine und Nukleinsäuren abbauender Enzyme.

Mithöfers besonderes Interesse gilt den Kannenpflanzen. Etwas mehr als 120 Arten der Gattung *Nepenthes* gibt es in den feucht-tropischen Regenwäldern Südostasiens, die meisten davon Kletterpflanzen. Vier *Nepenthes*-Arten wachsen im Gewächshaus von Mithöfers Institut in Jena.

Kannenpflanzen erbeuten vorrangig Bodeninsekten wie Ameisen und Termiten. Nachdem eine Kanne reif ist

und sich zu einem guten Viertel mit Saft gefüllt hat, öffnet sich der Deckel, und die „Jagdsaison“ kann beginnen. An ihrem Rand sondern die Kannen einen Nektar ab, der bei hoher Luftfeuchtigkeit extrem glitschig wird. Selbst die feinen Haftpolster der Insektenfüße finden hier keinen Halt. Unvorsichtige Insekten stürzen ab und ertrinken im Kannensaft.

Axel Mithöfer untersucht die Bildung der Verdauungssekrete, indem er die Kannen mit Taufliegen füttert und

danach in Nylonsöckchen steckt. „Damit wollen wir verhindern, dass Fliegen entkommen oder etwas anderes in die Kanne fällt.“

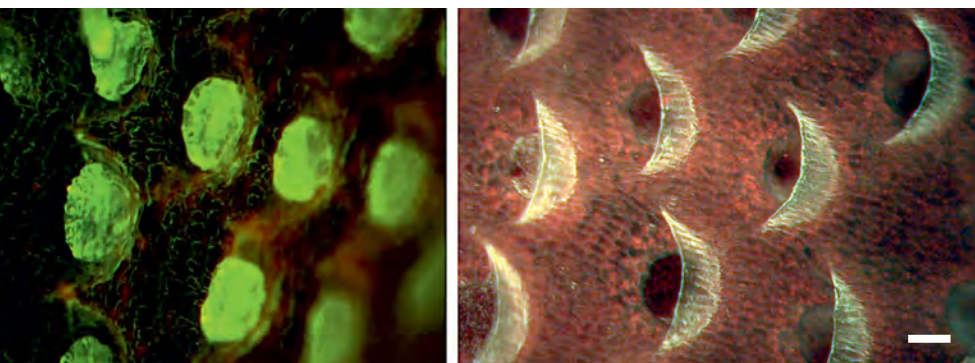
Und wie nehmen die Kannen die Beute wahr? „Anders als die Venusfliegenfalle produziert *Nepenthes* keine elektrischen, sondern chemische Signale. Vermutlich besitzen die Fallen der Pflanze Rezeptoren für Chitin – also die Substanz, aus der der Panzer von Insekten besteht. Während andere Pflanzen mit den Rezeptoren Fress-

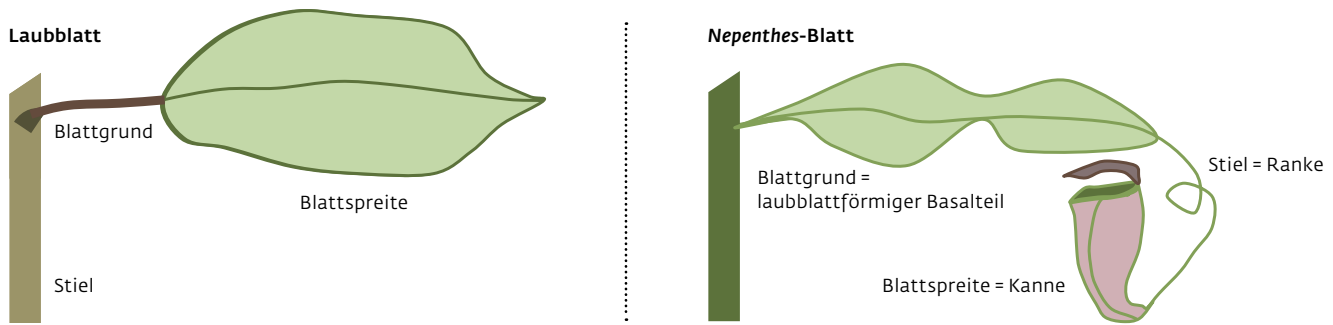


Oben Mit einer sterilen Spritze entnimmt Alberto Dávila-Lara Verdauungsflüssigkeit aus einer noch ungeöffneten Kanne zur weiteren Analyse.

Unten links Ein Fluoreszenzmikroskop macht die Drüsen in der Kannenwand sichtbar, die die Verdauungsflüssigkeit produzieren.

Unten rechts Die Drüsen liegen in Vertiefungen der Epidermis und sind von hervorstehenden Hauben bedeckt. (Der Balken entspricht einem zwanzigstel Millimeter.)





Metamorphose vom Blatt zur Falle: Im Laufe der Evolution haben sich bei *Nepenthes* der Blattgrund eines gewöhnlichen Laubblattes zum Basalteil und der Blattstiel zur Ranke der Kanne verwandelt. Die Blattspreite wurde schließlich zur eigentlichen Falle.

feinde wahrnehmen, melden sie den Kannenpflanzen die Anwesenheit von Beute. Sie schmecken ihre Nahrung also regelrecht.

CHITIN WIRKT VERDAUUNGSFÖRDERND

„Sobald die Rezeptoren das Chitin der Insektenpanzer registrieren, springt eine Signalkaskade an, die die Produktion von Verdauungsenzymen anstößt“, erzählt Mithöfer. Dabei ist einer der wichtigsten Signalstoffe das Phytohormon Jasmonsäure, das auch bei der Abwehr von Fressfeinden zum Einsatz kommt. Die Verdauungsenzyme stammen aus Drüsen im unteren Drittel der Kanne. Diese haben eine doppelte Funktion: „Sie scheiden nicht nur Sekrete aus, sondern nehmen auch die Nährstoffe der Beute auf und schleusen sie in die Pflanze ein.“

Normalerweise bilden Pflanzen in ihren Blüten Nektar, *Nepenthes* dagegen produziert Nektar an den Rändern ihrer Kannen. Und sie tut das auch nicht, um mit dem Nektar Bestäuber anzulocken, sondern weil sie Beute machen möchte. Anders als der Blütennektar, der Duftstoffe enthalten kann, ist der Kannennektar völlig geruchlos. Ameisen und Käfer finden ihn aber trotzdem ungeheuer attraktiv.

Mithöfers Doktorand Alberto Dávila-Lara hat entdeckt, dass der Kannenrand und die punktförmigen Nektardrüsen am Kannenkörper nicht nur süß sind, sondern unter Schwarzlicht im Labor violett erstrahlen. Eine chemische Analyse des Nektars hat ergeben, dass dafür wahrscheinlich ein Flavonoid verantwortlich ist. „Vielleicht ist es auch dieses Leuchten, was die Insekten anzieht“, sagt Mithöfer.

Um ihre Vermutung zu beweisen, wollen Axel Mithöfer und sein Team das Verhalten von Ameisen testen und ihnen natürlichen *Nepenthes*-Nektar und zum Vergleich einen künstlichen Nektar ohne das Flavonoid vorsetzen. Für die Versuche lassen sie eine komplette Ameisenkolonie samt Königin aus Indonesien nach Jena einfliegen.

Der Kannensaft enthält zwar schon kleine Mengen an Enzymen, bevor die erste Beute in ihm landet. Aber es kann zwischen zwei und drei Tagen dauern, bis sich genügend Verdauungsenzyme gebildet haben. „*Nepenthes* kann sich Zeit lassen, denn die Beute ist ihr ja sicher. Sie ist ein echter Genießer!“

Mithöfers Team hat den Kannensaft aus noch jungen, ungeöffneten Kannen entnommen und darin Kaliumchlorid, Spurenelemente, Verdauungsenzyme sowie sogenannte Naphthochinone nachgewiesen. Sobald die

Falle etwas gefangen hat, produziert sie weitere Verdauungsenzyme sowie Säure, die die Enzyme aktiviert. Die Naphthochinone haben antimikrobielle Wirkung und halten den Saft wahrscheinlich so lange wie möglich keimfrei. Wenn zu viele Insekten gefangen werden, kann die Pflanze die Vermehrung von Bakterien im Kannensaft nicht mehr verhindern. Dann wird die Falle entsorgt und abgeworfen.

ZU FALLEN UMGEBAUTE BLÄTTER

Auch wenn die Kannen meist auffällig gefärbt und gemustert sind: Sie sind nicht die Blüten, sondern verlängerte, verbreiterte und spezialisierte Blätter – ein wunderbares Beispiel für die vielfältigen Aufgaben, die Pflanzenblätter übernehmen können. An den Pflanzen hängen sie in allen Stadien: unreif und verschlossen, aktiv mit aufgeklapptem Deckel bis hin zu verschrumpelt und abgestorben. Ist eine Kanne zur Nahrungsaufnahme nicht mehr zu gebrauchen, wird sie meist erst abgeworfen, wenn die Pflanze möglichst viele Nährstoffe aus ihr zurückgezogen hat. Eine Kannenpflanze hat schließlich nichts zu verschenken.

Nicht alle fleischfressenden Pflanzen fangen ihr Futter selbst. Manche „lassen liefern“ und belohnen den Bringdienst

Axel Mithöfer untersucht die Signalwege, mit denen Pflanzen sich vor Fressfeinden und Krankheitserregern schützen. Manche der dabei benutzten Moleküle haben insektenfressende Pflanzen so umfunktioniert, dass sie damit selbst zum Räuber werden können. Die buschige Strahlenaralie in der Teeküche von Mithöfers Forschungsgruppe tut dagegen keiner Fliege etwas zuleide.



mit Süßigkeiten. Andere *Nepenthes*-Arten gewähren Ameisen Unterschlupf. Die Tiere leben behütet in Hohlräumen der Kannenpflanze und verteidigen ihre Vermieterin im Gegenzug gegen Fressfeinde. Die Verdauungssäfte können den Untermietern nichts anhaben, sie durchschwimmen sie einfach.

Die Pflanze profitiert zudem von den Ausscheidungen der Ameisen, aus denen sie wertvolle Nährstoffe bezieht. Diese Art der Ernährung kann mancherorts skurrile Formen annehmen: „Auf Borneo setzen sich Spitzhörnchen oder Ratten auf den Rand bestimmter *Nepenthes*-Arten mit besonders großen Kannen, lecken süßen Nektar von der Innenseite des Deckels – und lassen gleichzeitig ihre Ausscheidungen in die Kanne fallen. Eine andere *Nepenthes*-Art bietet Fledermäusen tagsüber Unterschlupf, deren Kot sie dann verwertet“, erzählt Mithöfer.

Neben Fleisch- und Kotfressern gibt es unter den Kannenpflanzen sogar Pflanzenfresser: *Nepenthes ampullaria* mit ihren großen Kannenöffnungen zum Beispiel wartet darauf, dass Blätter in ihre Kannen fallen.

Eine Pflanze, die sich im Laufe der Evolution zunächst von Licht, dann von Tieren und nun von anderen Pflanzen

ernährt – besser lässt sich der schier unendliche Einfallsreichtum der Natur kaum demonstrieren. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die Fähigkeiten zum Insektenfang haben sich bei den verschiedenen fleischfressenden Pflanzen unabhängig voneinander entwickelt.
- Die Methoden insektenfressender Pflanzen sind selten Neuerfindungen, vielmehr widmen sie Bewährtes um.
- Der Nektar, den Kannenpflanzen am Rand ihrer Kannen absondern, lockt Insekten nicht mit seinem Geruch an. Er leuchtet jedoch ultraviolett und zieht vermutlich auf diese Weise Insekten an.

GLOSSAR

Kannenpflanzen: Zurzeit sind etwa 120 *Nepenthes*-Arten bekannt, und noch immer finden Forscher neue Arten. Ihr Verbreitungsgebiet erstreckt sich von Madagaskar bis Neukaledonien und von China bis Nordaustralien. Die Blätter bestehen aus einem blattförmigen Teil, einer Ranke und der eigentlichen Kannenfalle. Bei manchen Arten werden die Fallen bis zu 50 Zentimeter groß. Viele *Nepenthes*-Arten sind durch den Verlust ihres Lebensraums und durch illegalen Handel vom Aussterben bedroht.

Venusfliegenfalle: Mit ihren Klappfallen fängt die fleischfressende Pflanze Insekten, die sie zunächst mit Salzsäure aus Drüsenzellen traktiert. Mit einer Verzögerung von einigen Stunden setzen die Drüsen zusätzlich Verdauungsenzyme frei. Die gelösten Nährstoffe werden dann von denselben Drüsen aufgenommen. Diese haben damit eine ähnliche Funktion wie Wurzeln. So lässt sich erklären, dass in den Zellen der Fallen nur Gene aktiv sind, die sowohl typisch für Blätter als auch für Wurzeln sind.

Freiheit ist unser System.

Gemeinsam für die
Wissenschaft.
70 Jahre Grundgesetz.

WISSENSCHAFTS

FREIHEIT.DE

Eine Initiative der Allianz der Wissenschaftsorganisationen



Informationen zur Kampagne und zu den Veranstaltungen
finden Sie unter www.wissenschaftsfreiheit.de



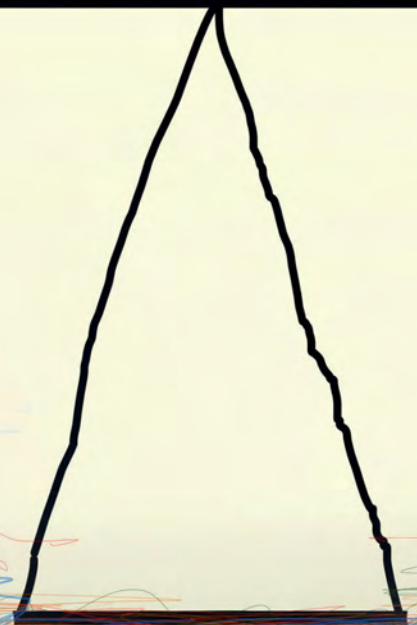
Auf Fairness programmiert

In Zukunft werden Computer immer häufiger über Menschen entscheiden – sei es bei der Kreditvergabe oder bei der Bewertung von Bewerbern. Doch automatische Systeme, die dafür bereits eingesetzt werden, diskriminieren immer wieder einmal einzelne Personengruppen. **Niki Kilbertus** und **Bernhard Schölkopf**, Forscher am **Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme** in Tübingen, wollen das ändern – mit fairen Algorithmen.

TEXT **TIM SCHRÖDER**

Auf den Fluren des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme in Tübingen hängen viele Wandtafeln. Im Vorbeigehen notieren die Wissenschaftler darauf ihre Gedanken. Manche diskutieren hier auch neue Ideen miteinander, wenn sie sich auf den Gängen begegnen. „Das hilft sehr“, sagt Niki Kilbertus, „weil ich aktuell sehr viele Ideen entwickeln muss“; Konzepte, die weit über das hinausgehen, womit er sich bislang beschäftigt hat. Niki Kilbertus hat Mathematik und Physik studiert. Er weiß, wie man komplexe Sachverhalte formal korrekt löst und wie man Algorithmen programmiert. Doch mit seiner Promotion hat er den Pfad der formalen Sprache ein Stück weit verlassen. Denn er befasst sich mit einer Frage, die bereits seit einiger Zeit in der Öffentlichkeit heiß diskutiert wird: ob oder inwieweit Algorithmen fair sein können.

Ausgewogene Kalkulation: Algorithmen dürfen keine Personengruppen wie etwa Frauen oder Männer diskriminieren.





Computer sind kühle Rechner, unbestechlich und irren sich nicht – könnte man meinen. Und doch kochte Ende 2018 eine Debatte darüber hoch, dass Computeralgorithmen Menschen diskriminieren. Es war bekannt geworden, dass ein großer Internethändler einen Computer bei Bewerbungen eine Vorauswahl treffen lassen wollte – und dass sich bereits in der Testphase gezeigt hatte, dass der Rechner Bewerbungen von Frauen öfter ablehnte als die von Männern. In den Medien gab es einen Aufschrei. Nicht zuletzt, weil Experten für die Zukunft erwarten, dass Computer mithilfe der riesigen Datenmengen, die heute verfügbar sind, immer häufiger über Menschen entscheiden werden. Es wäre skandalös, wenn sie dabei bestimmte Gruppen bevorzugten oder diskriminierten.

Angesichts solcher Szenarien haben sich weltweit Initiativen gegründet, die sich für Fairness in der künstlichen In-

telligenz starkmachen – und nicht nur dafür. Zugleich fordern sie, dass die Unternehmen geradestehen für das, was ihre Algorithmen tun. Sie fordern Verantwortlichkeit, Accountability. Außerdem erwarten die Kritiker Transparenz, wie und warum die Rechenvorschriften eine bestimmte Entscheidung treffen. Die Rede ist von FAT: Fairness, Accountability, Transparency.

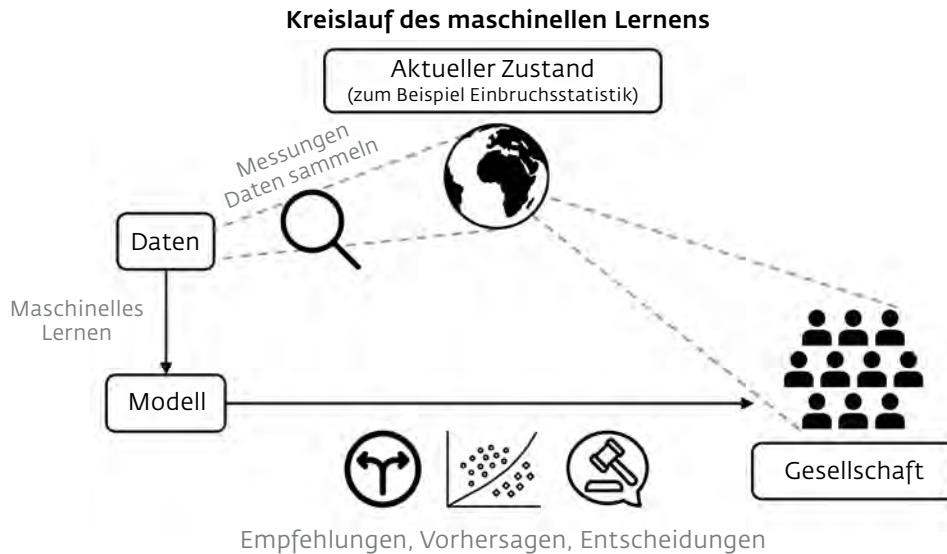
JEDE DISKRIMINIERUNG MUSS GENAU ANALYSIERT WERDEN

Niki Kilbertus arbeitet als Doktorand im Cambridge-Tübingen-Programm der Max-Planck-Gesellschaft und damit sowohl am Tübinger Max-Planck-Institut als auch am Pembroke College in Cambridge. Mit seinen Kollegen erforscht er den Part von FAT, der sich technisch umsetzen lässt: Die Wissenschaftler möchten Algorithmen Fairness beibringen. Dabei setzen sie auf maschinelles

Lernen, sie befähigen den Computer also dazu, durch Lernen und Erfahrungen langsam besser zu werden.

Die Arbeit ist anspruchsvoll. Denn eine technische Lösung, mit der sich Fairness vom Fleck weg in allen Anwendungen realisieren lässt, gibt es bislang nicht. Und das wird sich vermutlich auch nicht ändern: „Eine Lösung für alle Fragestellungen kann es nicht geben. Jedes Problem, bei dem eine Diskriminierung in den Daten auftaucht, ist anders und muss erst einmal analysiert werden“, sagt Kilbertus. „Und dann kommt der zweite Schritt, der mindestens genauso aufwendig ist: Für das Problem aus der realen Welt müssen wir eine mathematische Beschreibung finden.“

Allerdings folgt der algorithmische Analyseprozess stets einem klaren Schema: Man sammelt Daten, füttert diese in ein Analyseprogramm ein, dessen Algorithmen dann eine Empfehlung wie



zum Beispiel „Bewerber ungeeignet“ ausspucken. Damit dieser automatisierte Prozess künftig stets fair abläuft, müsse man ihn auf der Datenseite und auf der Ausgabeseite verbessern. „Man muss zunächst untersuchen, welche Daten wie erhoben werden, und dann überprüfen, welche Entscheidungen der Computer am Ende ausgibt und warum“, erläutert Niki Kilbertus. Die Analysen berühren dabei stets auch den Datenschutz. „Immerhin dreht es sich in allen Fällen um sensible persönliche Daten. Wir müssen also auch Lösungen finden, mit denen man Daten analysieren kann, ohne dass die Daten offenliegen.“

In Tübingen arbeitet der junge Forscher in der Gruppe von Bernhard Schölkopf, Direktor am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme. Beide beschäftigen sich mit dem grundlegenden Thema der Kausalität im maschinellen Lernen – mit der Frage, inwieweit Computer sinnvolle Schlüsse zwischen verschiedenen Aspekten ziehen können. Und genau diese Frage ist auch beim Thema Fairness zentral.

Niki Kilbertus hat ein Beispiel parat: die Kreditvergabe und die Über-

prüfung, ob jemand kreditwürdig ist. Setzt man einfache Algorithmen ein, die simple kausale „Wenn-dann-Beziehungen“ durchführen, kann es kritisch werden. Wenn Bewohner eines bestimmten Stadtteils in der Vergangenheit ihre Kredite weniger oft begleichen konnten, könnte der Algorithmus beispielsweise den Wohnort als Indikator für künftige Bewerber verwenden. Er versteht dabei nicht, dass der Wohnort vermutlich keinen direkten kausalen Einfluss auf die Kreditwürdigkeit hat und dass es wohl eher andere relevante Faktoren gibt.

DER ALGORITHMUS MÜSSTE SEINE ANNAHMEN ÜBERPRÜFEN

Oft ist es so, dass das System mit historischen Daten über Kreditrückzahlungen trainiert wird und dann aus den persönlichen Daten wie etwa dem Wohnort neuer Bewerber deren Kreditwürdigkeit berechnet: Wie wahrscheinlich ist es, dass der Bewerber seinen Kredit zurückzahlt? Da aber zum Beispiel auch an einem aus Sicht des Algorithmus schlecht beleumundeten Ort eine

Oben Mit der Welt rückgekoppelt: Ein Algorithmus des maschinellen Lernens löst eine Frage, etwa in welchen Stadtteilen mit vielen Einbrüchen zu rechnen ist. Dafür wird er mit Daten zum aktuellen Zustand gefüttert, zum Beispiel mit Daten zur wirtschaftlichen und sozialen Lage sowie zur Kriminalität. Daraus entwickelt der Algorithmus ein Modell, anhand dessen er Vorhersagen, Entscheidungen oder Empfehlungen ausgibt. Wenn höhere Polizeipräsenz in einem Viertel dann Verbrechen verhindert, verändert das die Gesellschaft und so den Zustand der Welt. Daran muss der Algorithmus das Modell mit neuen Daten anpassen.

Rechte Seite Freiraum für Ideen: Mateo Rojas-Carulla, Niki Kilbertus und Nadine Rüegg (von links) tauschen sich über unterschiedliche Aspekte der künstlichen Intelligenz aus.



kreditwürdige Person wohnen kann, kann der Computer manche Personen unbeabsichtigt diskriminieren.

„Im Grunde müsste der Algorithmus so ausgestattet sein, dass er seine Annahmen regelmäßig überprüft“, sagt Niki Kilbertus. Etwa, indem er nach bestimmten Kriterien doch hin und wieder einer Person einen Kredit gibt, die zunächst als nicht kreditwürdig eingestuft ist. Wirtschaftswissenschaftler nennen dieses Vorgehen auch *explore versus exploit*. *Explore* bedeutet, neue Lösungen zu testen, zu explorieren. Mit *exploit* ist hingegen gemeint, einen bestehenden Ansatz, so gut es geht, auszunutzen, um zum Beispiel den Aufwand für eine neue Entwicklung zu vermeiden. Im Fall der Kreditvergabe würde das System beim *Explore*-Ansatz gelegentlich Kredite entgegen den ursprünglichen Regeln vergeben. Zahlt die Person den Kredit wider Erwarten doch zurück, muss der Algorithmus angepasst und verbessert werden.

Das Beispiel zeigt, dass die bislang genutzten Daten in bestimmten Fällen für eine faire Entscheidungsfindung nicht ausreichen. Niki Kilbertus: „In Sachen

Fairness besteht die Herausforderung darin, Daten so gut wie möglich in einen realistischen, kausalen Zusammenhang zu stellen.“ So lasse sich vermeiden, dass ein Algorithmus die Daten nur als eine große Ansammlung von Zahlen betrachtet, zwischen denen er dann munter wilde Korrelationen herstellt, die mit kausalen Zusammenhängen aber oft nichts zu tun haben dürften.

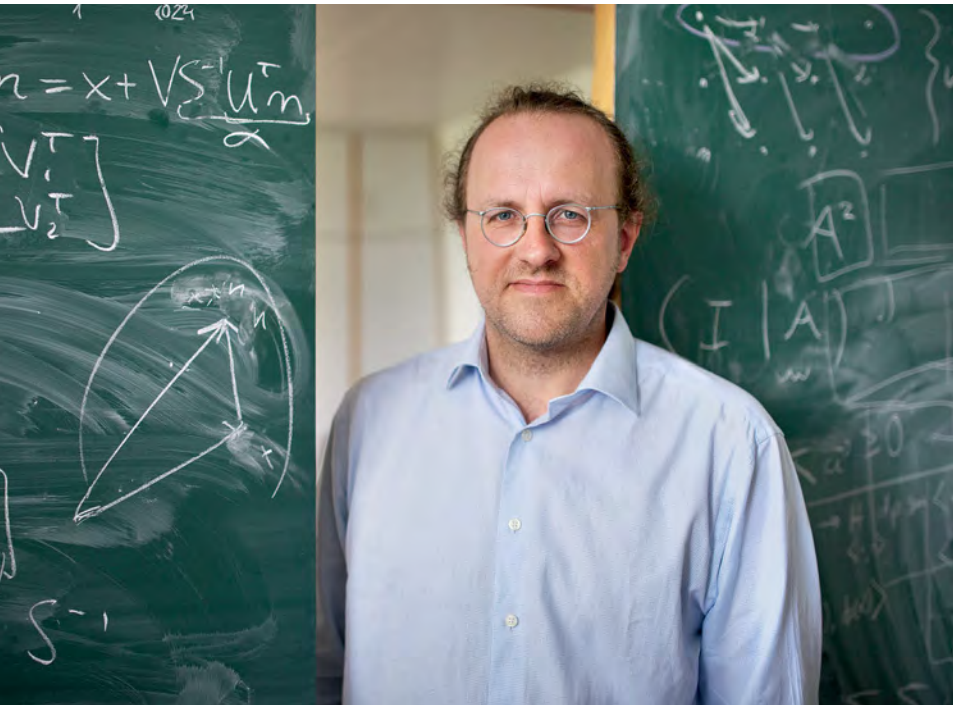
ES KOMMT AUF DIE WAHREN KAUSALEN ZUSAMMENHÄNGE AN

Niki Kilbertus veranschaulicht das mit einem abwegigen Beispiel. So könnte ein Algorithmus erkennen, dass Menschen, die Kredite mit höherer Wahrscheinlichkeit zurückzahlen, eher ordentlich sind und zu Hause Filzgleiter unter ihre Stühle kleben. Da eine Rechenvorschrift per se keine Zusammenhänge versteht, könnte sie daraus schließen, dass es sinnvoll ist, neuen Kreditnehmern eine Packung Filzgleiter zu schenken, um ihre Kreditwürdigkeit zu erhöhen. „Nur wenn wir die wahren kausalen Zusammenhänge kennen, können wir sinnvolle Fragen stellen

wie: Hätte die Person zurückgezahlt, wenn sie anderswo leben würde?“, sagt Niki Kilbertus. Falsche Kausalitäten etwa zwischen dem Besitz von Filzgleitern und der Zahlungstreue ließen sich hingegen ausschließen.

Wie wichtig es ist, Kausalitäten richtig zu erkennen, zeigt auch das Beispiel des Simpson-Paradoxons. Dieses wurde nach dem britischen Statistiker Edward H. Simpson benannt, der in den 1950er-Jahren gezeigt hat, dass sich durch eine bestimmte Kombination von Daten aus verschiedenen Gruppen, etwa Frauen und Männern, scheinbar paradoxe Situationen ergeben. Das klassische Beispiel für ein Simpson-Paradoxon stammt aus dem Jahr 1973. Damals gab es große Aufregung, weil an der US-amerikanischen University of California in Berkeley von den Frauen, die sich beworben hatten, ein geringerer Anteil zum Studium zugelassen worden war als von den männlichen Bewerbern.

Doch lag hier kein Fall von Diskriminierung vor. Eine Analyse der Daten ergab später, dass sich Frauen eher für die stark überlaufenen geistes- und gesellschaftswissenschaftlichen Fächer ange-



Lehre für Maschinen: Bernhard Schölkopf bringt Algorithmen bei, in Daten die wahren kausalen Zusammenhänge zu erkennen. Das trägt auch dazu bei, dass Computer faire Entscheidungen treffen.

nur hellhäutige Menschen auf Hautkrebs untersucht hat, könnte bei dunkelhäutigen eher falsch diagnostizieren und möglicherweise einen Tumor übersehen. Dunkelhäutige Menschen würden bei ihm also nicht mit derselben Qualität behandelt werden wie hellhäutige. Die vermeintliche Unfairness kann aber damit erklärt werden, dass dem Arzt die Erfahrung mit bestimmten Patientengruppen fehlt.

Ob ein Algorithmus in Zukunft fair entscheidet, hängt also auch davon ab, wie Unternehmen oder Menschen allgemein Fairness definieren oder empfinden. „Über allem steht natürlich, dass ein Algorithmus stets richtig entscheiden soll“, sagt Niki Kilbertus. „Doch was richtig ist, das muss in jedem Falle erst einmal geklärt werden.“

Dabei müsse man noch etwas bedenken: Entscheidungen von Computern können einen aktiven Einfluss auf die Welt haben. Ein Beispiel sind moderne Programme, die aus Einbrüchen und Diebstählen in einer Stadt ermitteln, in welchen Vierteln am ehesten mit weiteren Einbrüchen zu rechnen ist. Die Aussage des Algorithmus wird dazu führen, dass dort mehr Polizei präsent ist, und möglicherweise auch dazu, dass dort mehr Straftaten aufgedeckt werden. Doch ist denkbar, dass dort in Wahrheit nicht mehr Straftaten begangen worden sind, sondern dass mehr aufgedeckt wurden, weil die Polizei dort besonders häufig auf Streife war.

„Die Ergebnisse eines Algorithmus können also falsche Schlüsse nach sich ziehen – wir sprechen hier von einem Feedback-Loop, bei dem der Algorithmus das reale Leben beeinflusst.“ Ein ähnliches Beispiel ist die Stauwarnung von Navigationsdiensten. Ist es auf einer Straße voll, empfiehlt der Service, auf

meldet hatten – und deshalb insgesamt häufiger abgelehnt wurden als Männer, die sich für die weniger nachgefragten Fächer wie Chemie oder Ingenieurwissenschaften beworben hatten. Das Paradoxon bestand darin, dass der prozentuale Anteil der zugelassenen Frauen innerhalb der meisten Studiengänge sogar höher war als der der angenommenen männlichen Bewerber; über alle Studiengänge gemittelt, überwog aber etwas der prozentuale Anteil der männlichen Bewerber, die angenommen worden waren. „Erst wenn wir die richtigen Daten haben und wissen, für welches Department sich die Frauen beworben haben, können wir den kausalen Zusammenhang richtig verstehen: Das Geschlecht beeinflusst die Fächerwahl. Dann können wir diese Situation richtig interpretieren“, sagt Kilbertus.

Bernhard Schölkopf geht bei der Frage nach den richtigen Kausalitäten sogar noch weiter. Für ihn stellt sich auch die Frage, wo Fairness beginnt. Etwa bei der Frage, ob in den USA Afroamerikaner bei einer Bewerbung die gleichen Chancen haben wie ihre weißen Mitbewerber? „Oder muss man schon früher anfangen, etwa bei dem

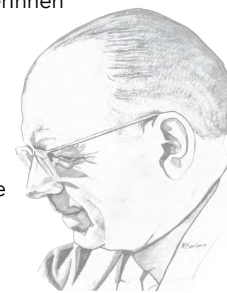
Gedanken, dass schwarze Kinder nicht dieselben Bildungschancen haben wie weiße – was ihre ganze Vita und später ihre Chancen, eine Arbeit zu finden, beeinflusst?“ Schölkopf fragt, ob man nicht auch solche Aspekte einfließen lassen müsste, um eine wirklich faire Rechenvorschrift zu kreieren – einen Algorithmus mit mehreren Ebenen der Fairness sozusagen.

AUCH MENSCHEN HANDELN NICHT IMMER FAIR

Allerdings mahnt er auch, die Kirche im Dorf zu lassen. „Menschen entscheiden täglich über andere Menschen. Warum sich ein Mensch so oder so entscheidet, ist oftmals völlig intransparent. Von einem Algorithmus aber verlangen wir, dass dieser immer hundertprozentig richtig und fair entscheiden muss.“ Letztlich führe das Studium der Fairness bei Maschinen auch zu der Einsicht, dass Menschen ebenfalls nicht immer fair handeln – einfach deshalb, weil sie beispielsweise aufgrund mangelnder Information oder Erfahrung Fehler machen. Genau wie Maschinen. Ein Hautarzt beispielsweise, der in seiner Karriere

ERNST HAAGE-PREIS AUSSCHREIBUNG 2019

Der Ernst Haage-Preis zeichnet seit 2006 junge WissenschaftlerInnen für herausragende Leistungen auf dem Forschungsgebiet der Chemie aus und fördert insbesondere den wissenschaftlichen Nachwuchs. Die Auszeichnung wird von der Mülheimer Ernst Haage-Stiftung verliehen und ist mit einem Preisgeld von € 7.500,- dotiert.



FORSCHUNGSPREIS CHEMIE

Nominiert werden können promovierte WissenschaftlerInnen einer deutschen Forschungseinrichtung. Sie sollten ihren Lebensmittelpunkt in Deutschland haben, in der Regel nicht älter als 40 Jahre sein und noch nicht in einem unbefristeten Anstellungsverhältnis stehen.

Mit dem Preis sollen exzellente wissenschaftliche Leistungen aus allen grundlagenorientierten Forschungsgebieten der Chemie ausgezeichnet werden

Nominierungen können ab sofort bis zum 03. August 2019 schriftlich per E-Mail beim Stiftingskuratorium (ernsthaagepreis@cec.mpg.de) eingereicht werden. Folgende Unterlagen sollten Teil der Kandidatenvorschläge sein:

- zweiseitige Laudatio
- tabellarischer Lebenslauf
- vollständige Publikationsliste
- bis zu drei Sonderdrucke von Arbeiten der nominierten Person.

Eigenbewerbungen können nicht berücksichtigt werden.

ERNST HAAGE-PREIS AUSSCHREIBUNG 2019



Max-Planck-Institut
für Kohlenforschung

Weitere Informationen zum Ernst Haage-Preis, zur Stiftung und Preisverleihung stehen unter <http://www.cec.mpg.de> zur Verfügung.



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR
CHEMISCHE ENERGIEKONVERSION

Max-Planck-Institut
für Chemische Energiekonversion
z.Hd. Frau Esther Schlamann
Stiftstr. 34-36
45470 Mülheim an der Ruhr

E-mail: ernsthaagepreis@cec.mpg.de

andere Strecken auszuweichen – auf denen sich dann kurze Zeit später der Verkehr staut. Niki Kilbertus mahnt aus diesem Grund, nicht nur die Fairness im Blick zu behalten, sondern auch die Feedbackeffekte.

Er hat in seiner Promotion bereits einige Diskriminierungsfälle analysiert und erste Versuche gemacht, das jeweilige Problem mathematisch zu beschreiben. „Die Programmierarbeit braucht noch einmal mindestens so viel Zeit wie die Analyse jedes Falls.“ Doch noch ist für ihn und seine Kollegen die Analyse die Hauptarbeit. „Jeder Algorithmus arbeitet mit bestimmten Kriterien, aus denen eine Aussage abgeleitet wird. Wir versuchen jetzt herauszufinden, wo die Kriterien brechen, wo die Schwachstelle ist.“

Eine interessante Frage sei etwa, warum der Algorithmus des bereits erwähnten Internethändlers im vergangenen Jahr scheinbar Bewerberinnen benachteiligt hat. Zwar sei nicht bekannt, wie der Algorithmus im Detail arbeitete, Kilbertus hat aber eine Vermutung. „Man darf davon ausgehen, dass versucht wurde, die Bewerbungen anonymisiert zu analysieren.“ Dem System waren also wohl weder Geschlecht noch Name bekannt. Dennoch hat es nicht funktioniert. „Andere Studien zeigen, dass Frauen in Bewerbungen oft-

mals soziales Engagement oder entsprechende Tätigkeiten angeben, Männer hingegen signalisieren eher Dominanz und wirken kompetitiver“, erklärt Kilbertus. „Das können dann genau die Fähigkeiten sein, die das Unternehmen sucht.“ Bernhard Schölkopf ergänzt: „Es ist falsch anzunehmen, dass wir grundsätzlich Fairness erreichen, indem wir dem Algorithmus bestimmte Angaben wie das Geschlecht vorenthalten.“ Diese *fairness by unawareness*, Fairness durch Unwissenheit, klappe längst nicht immer.

Wie auch immer sich Algorithmen Fairness beibringen lässt, im Vergleich zu den rein mathematischen Formalismen, mit denen sich Niki Kilbertus früher beschäftigte, handelt es sich eher um ein weiches Kriterium. Auch wenn er die Möglichkeit schätzte, Aussagen klar beweisen oder falsifizieren zu können, empfindet er den neuen Aspekt als bereichernd. „Es ist sehr interessant, an einem solchen gesellschaftlich relevanten Thema zu arbeiten“, sagt er. Dass für seine Forschungsarbeit mathematisches und informatisches Wissen nicht ausreichen, wurde ihm ziemlich schnell klar. Deshalb hat er sich auch in Sozialwissenschaften und in juristischen Fragestellungen weitergebildet. Und das ist hoffentlich genug Rüstzeug, um wirklich faire Algorithmen zu finden. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Algorithmen entscheiden immer häufiger über Menschen, dabei kommt es immer wieder zu Diskriminierungen, nicht zuletzt, weil in Daten falsche kausale Zusammenhänge wie etwa zwischen dem Wohnort und der Kreditwürdigkeit einer Person hergestellt werden.
- Um Algorithmen Fairness beizubringen, analysieren die Forscher des Tübinger Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme in jedem einzelnen Fall, welche Daten die Rechenvorschrift verwendet und wie sie daraus zu Entscheidungen kommt.
- Anhand ihrer Erkenntnisse zu den tatsächlichen kausalen Zusammenhängen, die die Antwort auf eine Frage wie etwa „Welche Person wird einen Kredit zurückzahlen?“ liefert, formulieren die Forscher für das jeweilige Problem eine mathematische Beschreibung.

Die Kunst der Orientierung

Jeder Stadtplan, jede Karte enthält Geschichten über die Zeit ihrer Entstehung. Die Kunsthistorikerin **Tanja Michalsky** untersucht an der **Bibliotheca Hertziana**, dem Max-Planck-Institut für Kunstgeschichte in Rom, wie Menschen die Welt vermessen haben. Mit ihrer Forschung erweitert sie das Spektrum ihres Fachs – bis hin zu Filmen von Federico Fellini und David Lynch.

TEXT **MARTIN TSCHECHNE**

Vom Dach der Bibliothek aus entrollt sich die Stadt wie eine Karte im Maßstab eins zu eins. Romanautoren wie Umberto Eco haben solche fantastischen Karten erdacht, Jorge Luis Borges oder Michael Ende – Abbilder, die mit der Wirklichkeit vollkommen übereinstimmen, paradox und nur als Idee zu erfassen. Die Literatur genießt da fast unbegrenzte Freiheit. Aber hier liegt ein solches Kunstwerk dem Betrachter ganz real zu Füßen, wie ausgebreitet zu Studienzwecken: ein wogendes Meer aus Dächern und Giebeln; Türme und Kathedralen ragen daraus hervor, geradeaus die Kuppel von Sankt Peter, ein heller Fleck nur vor dem Horizont. Von rechts schiebt sich der Justizpalast wie ein kalkgrauer Riegel vor ein ganzes Stadtviertel.

Tanja Michalsky ist auf die Terrasse der Bibliotheca Hertziana getreten und lässt den Blick wandern. Zur Linken, im Süden, herrscht die monumentale Säulenspanne des Nationaldenkmals für Vittorio Emanuele II über ein vergangenes Königreich, ein Tempel nach griechischem Vorbild, keine hundert Jahre alt. Der ausgestreckte Arm der Hausher-

rin greift Pantheon und Trajanssäule aus dem Strudel der Epochen, triumphale Zeugnisse der römischen Antike. Tief unten auf der Via Gregoriana, der schmalen Straße vor dem Haus, schieben sich Autos und knatternde Vespas zwischen den Passanten hindurch: Rom, im Frühjahr 2019. Gegenwart. Gegenüber öffnet sich ein Innenhof und, ebenfalls von der höheren Warte des Forschungsinstituts aus einzusehen: ein Dachgarten, ein rostiges Geländer zwischen roten Ziegeln, Stühle, eine Wäschespinn, ein paar Töpfe mit wucherndem Grün.

DAS NEBENEINANDER VON UNGLEICHZEITIGEM PRÄGT ROM

Wie ein feines Netz ziehen sich diese Orte des Rückzugs über die Stadt – hat je einer sie auf einer Karte festgehalten? Sie als weitere Schicht erkannt hoch über den versunkenen und vergrabenen, den antiken, mittelalterlichen und modernen, den kommerziellen und repräsentativen Ebenen des Lebens hier? Von warmen Abenden unter dem Sternenhimmel wäre daraus zu lesen, von der Sehnsucht, doch zumindest zeitwei-

lig ein paar Stockwerke über die tief gestaffelte Geschichte hinauszusteigen. Gab es diese Stadt eigentlich schon, bevor Federico Fellini sie erfunden hat? Oder hat der große Regisseur mit Filmen wie „Roma“ oder „La dolce vita“ nur ihr perfektes Abbild geschaffen?

„Gehen Sie mal zur Fontana di Trevi“, rät die Kunsthistorikerin. „Erleben Sie das Gedränge. Und fragen Sie sich, welche Idee die Massen dort hinzieht.“ Rund um die Uhr muss die Polizei Touristenpärchen davon abhalten, über den Rand des barocken Brunnens ins lichtblaue Wasser zu steigen und sich dort so innig zu küssen, wie Anita Ekberg und Marcello Mastroianni es 1960 in Fellinis Filmklassiker vom süßen Leben der römischen Schickleria vorgemacht haben. „Aber jeder“, fügt Michalsky hinzu, „wirklich jeder wirft eine Münze in das Becken, um das Schicksal zu beschwören und einmal an diesen Ort zurückkehren zu dürfen.“

Es sei genau dieses Nebeneinander von Ungleichzeitigem, sagt die Forscherin, das nicht nur das Lebensgefühl in der Stadt bestimme, sondern auch ihrer Arbeit Thema und Richtung gebe. „Hier in Rom musste die Kunst nicht alles



Eigene Richtung:
Tanja Michalsky treibt die
kunsthistorische Forschung in
bisher unbekante Regionen.



neu erfinden“, erläutert sie den Ausgangspunkt ihrer Recherchen. „Es war ja so vieles schon da!“ Was sich daraus im Verhältnis zu den Strukturen und Usancen ihrer Zunft ergibt: Jemand muss Pfade legen. Spuren verfolgen, Kontexte definieren. Und bei jedem Schritt auf einer Ebene der Zeiten alle anderen im Auge behalten.

Tanja Michalsky ist in Duisburg aufgewachsen, manchmal lässt sie den Ruhrpott noch durchklingen. Welches Signal setzt so ein Akzent? Steckt eine Absicht dahinter? Sie trägt Jeans und flache Schuhe, ihr hellblondes Haar ist kurz geschnitten, ihr Auftreten geradeheraus. Wer eine Geschichte neu und anders erzählen will, der darf sich nicht Bange machen lassen. Ihr Mann, fügt sie noch hinzu, Klaus Krüger, Professor für Kunstgeschichte an der Freien Universität Berlin und Kenner der italienischen Kunst des Mittelalters und der frühen Neuzeit, sei gerade in der Stadt unterwegs, um eine neue Batterie für das gemeinsame Auto zu besorgen. Ein Cinquecento? „Nein“, sagt Michalsky, „ein Toyota.“ Der Alltag ist eben banal, selbst in Rom. Der Verkehr quält sich durch die Stadt, es ist laut, die Müllabfuhr ist säumig. Die Kulturhistorikerin registriert.

Vor nunmehr drei Jahren kehrte sie zurück als Direktorin am Max-Planck-Institut für Kunstgeschichte in Rom. In den 1990er-Jahren hatte sie von hier aus die Grabmäler der Anjou in Neapel für ihre Dissertation erkundet. Hatte Steinplatten freigekratzt und verwitter-

te Inschriften entziffert, um ein französisches Königshaus des Mittelalters in der schier endlosen Kette fremder Herrscher über Neapel zu verorten und die komplexen Wechselwirkungen zwischen heimischen und importierten Kulturen zu identifizieren.

VON WEGEN FEGEFEUER – ES GING UM MACHTPOLITIK!

„Wie interpretiert man schräge Artefakte aus vergangenen Zeiten?“, umschreibt sie den Kern ihres Projekts – wieder mal salopp und pointiert. „Und wieso eigentlich ist ein Grab so wichtig als Zeugnis einer politischen Situation?“ Es muss ihr eine Lust gewesen sein. Und am Ende der detektivischen Wühl- und Puzzlearbeit die handfeste Erkenntnis: „Von wegen ‚verschone mich vor dem Fegefeuer‘ – darum ging es ihnen zuallerletzt! Die Memorialkultur des Mittelalters dreht sich allein darum, den eigenen Stammbaum zu stärken und zu sichern. Reine Machtpolitik.“

Und wo bleibt die Kunst? Die Kunsthistorikerin reagiert routiniert. Die Päpste, die aus Avignon heimgekehrte Kurie zu Beginn des 15. Jahrhunderts, das dringende Bedürfnis, nun vor aller Welt den Start in eine neue, geläuterte Zeit zu inszenieren, die Protagonisten dieses Aufbruchs, Heldenfiguren wie Leonardo, Michelangelo und Raffael – das alles hat ihrer Disziplin großartigen Stoff gegeben. Die Erfolge der Forscher am 1913 von der Mäzenin Henriette Hertz gegründeten Institut waren spektakulär –

die Antike, die Heroen der Renaissance, die glanzvolle Kunst und Architektur des Barock. Und es ist noch gar nicht lange her, da rettete die Amtsvorgängerin Sybille Ebert-Schifferer von hier aus die Welt vor einer Überschwemmung mit falsch zugeschriebenen Bildern des großen Barockmalers Caravaggio.

Und doch lenkt Tanja Michalsky ihre Arbeit in eine neue Richtung. Es sei ein Mythos, sagt sie, dass Rom für tausend lange Jahre ohne Bewusstsein war, ein kaum besiedeltes Trümmerfeld vergangener Größe, das darauf wartete, endlich wieder wachgeküsst zu werden. Und sie verweist auf Erwin Panofsky, der unter Kunsthistorikern selbst so etwas wie einen Heldenstatus genießt: „Die Renaissancen der europäischen Kunst“ lautete 1960 der Titel seines bahnbrechenden, Mythen stürzenden Werks. Man achte auf den Plural! Denn schon Karl der Große zitierte Ideen und Vorbilder aus der Antike und berief sich auf sie, um sich als Kaiser eines – notabene – römischen Reichs deutscher Nation zu inszenieren.

„Es gab eben nicht nur eine Renaissance“, stellt die Leiterin des Instituts in Rom klar. „Es gab mehrere: eine karolingische, eine weitere im 13. Jahrhundert, um nur die wichtigsten zu nennen. Leider sind uns die Bezeichnungen nicht so vertraut.“ Deshalb spricht sie von Appropriationen der antiken Kultur – und meint damit eher die Techniken und Resultate der Aneignung als ein historisches Ereignis. Die Statuen und Bauten aus der Antike wa-



Beste Aussicht: Die Dachterrasse der Bibliotheca Hertziana eröffnet den Blick auf die Dächerlandschaft von Rom mit der Kuppel der Kirche San Carlo al Corso (links), dem Nationaldenkmal für Vittorio Emanuele II (weißer Monumentalbau, Mitte) und der Kuppel des Petersdoms (rechts).

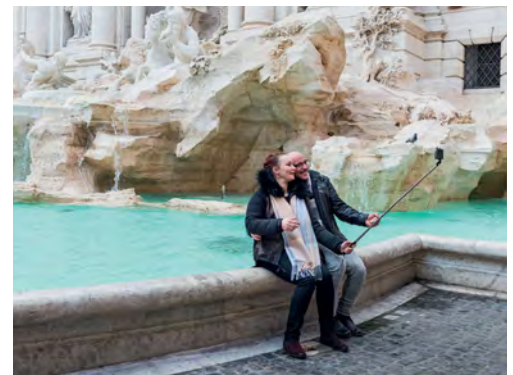
ren ja da. Sie gehörten zum Alltag. Jeder konnte sie betrachten und befragen. Und viele taten es.

Mehr Mittelalter also. Mehr Gegenwart. Und mehr Aufmerksamkeit für die Migration von Menschen und Kultur, für die vielfältige Vernetzung des italienischen Südens mit dem Rest von Europa und der Welt, die sie am Beispiel von Neapel so konzentriert erlebt hatte. Wer die Geschichte einer Stadt studieren will, das Wesen der Urbanität schlechthin, der kommt nicht umhin, jede der vielen Schichten einzeln abzutragen, alle Zutaten dieses Amalgams zu filtern und ihr Zusammenspiel zu rekonstruieren: angevinische Grabplatten und griechische Säulen, Goten, Staufer, Spanier und Bourbonen, Nationaldenkmäler, Dachgärten. Das Freikratzen von verborgenen, überwucherten und verwitterten Verbindungen hat sie lange genug praktiziert. Und das Prinzip gilt für Rom wie für Neapel wie für alle Städte.

Genau deshalb beschloss sie mit Tristan Weddigen, dem zweiten Direktor an der Bibliotheca Hertziana, das Programm des Instituts auf frühere Epochen und über den Süden Italiens hinaus zu erweitern und das alles mit der Gegenwart zu verknüpfen. Tanja Michalsky liebt es, den Diskurs in noch unbekannte Regionen voranzutreiben. Dort sind Entdeckungen zu machen.

So liegen nun mittelalterliche Stadtpläne auf dem Tisch ihres Büros, im Regal dahinter stehen DVDs mit Klassikern von Fellini oder den geheimnisvollen, von David Lynch wie hauchdünne Folien übereinandergeschichteten Ebenen der Realität. In „Lost Highway“, der mysteriösen, von dunklen Fantasien gejagten Expedition in das Medium Film, erblickt die Kunsthistorikerin ein Modell für die Forschungsarbeit ihrer eigenen Zunft. Kollegen erkunden von Rom aus das Europabild außerhalb Europas, rekonstruieren die globale Vernetzung der italienischen Kunst seit der frühen Neuzeit, suchen den wechselseitigen Austausch mit Regisseuren und Produzenten der Filmstudios von Cinecittà. Und kommen mit alledem dem komplexen Wesen dieser Stadt deutlich näher.

Die Schichten des urbanen Lebens, die Vernetzung von Zeiten und Kulturen, die offenen und verdeckten Motive jeder Reduktion von Wirklichkeit – war es da nicht eine hübsche Ironie, dass eine halbe Stunde zuvor schon der Weg zum Institut auf den Pincio am Rand der Innenstadt eine Ahnung vom vertrackten Spiel zwischen Wirklichkeit und Fiktion vorwegnahm? Rom ist nun mal auf Hügeln gebaut, mancher Weg windet sich in weiten Kurven bergan. Also hatte der hilfsbereite Portier im Hotel einen dieser handlichen Stadtpläne für Touristen hervorgezo-



Quell der Sehnsucht: Seit Federico Fellini die Fontana di Trevi in seinem Film „La dolce vita“ mit Anita Ekberg und Marcello Mastroianni verewigt hat, gehört dieser Brunnen zu den großen Touristenattraktionen in Rom.

gen und mit dem Kugelschreiber Kreuze darauf gezeichnet: Sie sind hier, dort wollen Sie hin.

Die vielen Gassen und Durchgänge aber hatte die Karte unterschlagen. Einmündungen und Kreuzungen auch größerer Straßen waren verschoben, die Proportionen verzerrt. Dafür war auf dem einheitlichen Hellrot der bebauten Flächen Platz entstanden, auf eine Bar hinzuweisen, eine Pizzeria, einen Mofaverleih. Die Betreiber hatten die Manipulation der Realität aus ihrem Werbeetat bezahlt. Und der Reisende, so viel war aus der Karte zu lesen, sollte nicht

Aufschlussreicher Plan: Die Karte von Rom, die Paolino Minorita vor rund 700 Jahren zeichnete, zeigt unter anderem, dass der Blick damals nach Osten, zum Orient, ausgerichtet war – daher der Begriff „orientieren“.

planlos durch die Stadt schlendern, sondern Geschäfte aufsuchen, den Umsatz ankurbeln. Ist das nicht empörend?

JEDE KARTE IST EINE VERKÜRZUNG DER REALITÄT

Tanja Michalsky muss lachen. „Sehen Sie“, sagt sie und klappt in ihrem Büro ein paar Stockwerke unter der Dachterrasse den Computer auf. Ein Plan der Stadt Rom von Paolino Minorita aus dem frühen 14. Jahrhundert erscheint. Die Repräsentation einer sich stetig verändernden Welt ist nun mal ein Thema der Kunsthistorikerin, seit sie sich im Rahmen ihrer Habilitation mit niederländischer Landschaftsmalerei befasst hat. Und die Zeichensysteme der Kartografie sind eine Form, diese Welt zu dokumentieren.

Die Eroberung von Räumen, die reifen Fertigkeit, einen Ort anhand seiner topografischen Daten zu erfassen und abzubilden, die fortschreitende Abstraktion, von frühen Versuchen einer Vogelperspektive bis zum zentimetergenauen Satellitenabbild GPS – alles ist aus einer Karte herauszulesen. Doch die Wissenschaftlerin warnt zugleich vor den systematischen Verzerrungen, die dem Medium innewohnen, den Irrungen und Versuchungen. „Jede Karte ist eine Verkürzung der Realität“, fasst sie zusammen. „Und jede Verkürzung folgt einer Absicht.“ Manchmal einer bösen, manchmal auch nur schnödem Geschäftssinn.

Dieser Paolino Minorita wird ein redlicher Mann gewesen sein. Sogar die Hügel der Stadt hat er auf seiner Karte registriert, in seitlicher Ansicht, weil es



noch ein paar Jahrhunderte dauern sollte, bis die Erkenntnis gereift war, dass Gipfel und Grate, von oben betrachtet, ganz anders aussehen als aus der vertrauten Perspektive. Die Methode, sie anhand von Höhenlinien auf einer Karte zu verzeichnen, kam aus der Schweiz. Tanja Michalsky schmunzelt, als sie auf die Urheberschaft verweist. Solche Fundstückchen machen ihr Freude. Na klar, die Schweizer! Die Geschichte der Kartografie erzählt eben ihre ganz eigenen Geschichten.

Der Kartograf des spätmittelalterlichen Rom hat ein Netz von Straßen eingezeichnet, Wasserleitungen; das Pantheon ist an seinem Säulenportal zu erkennen, die Engelsburg, mit etwas Fantasie auch das Kolosseum. Der Finger der Wissenschaftlerin saust über die Karte, als wäre es ihre eigene Gegenwart, die da vor 700 Jahren festgehalten worden ist. Der Autor hat eine Dramaturgie vorgegeben, und jeder Ort spielt seine Rolle: Er soll von der Geschichte der Stadt erzählen. Paolino hat die topografischen Anker mit erläuternden Texten auf anderen Repräsentationsebenen verlinkt, als habe er im fernen Mittelalter eine Computer-App entwickeln wollen.

So groß ist der Unterschied nicht zum Wegeplan der Gegenwart, der so dreist die Ziele der Werbung in den Fokus rückt. Schön, der breite Fluss, offenbar der Tiber. Er schlängelt sich nicht wie gewohnt südwärts durch die Stadt, sondern läuft quer über die Karte. Aber das kann die Wissenschaftlerin rasch klarstellen: „Die Gewohnheit, unser Bild der Welt stets und immer nach Norden auszurichten“, erläutert sie, „kam erst viel später auf, im 17. Jahrhundert. Vorher gab der Osten die Blickrichtung vor, der Orient – daher auch das Wort ‚orientieren‘.“

Übrigens wäre es gar nicht schwer gewesen, selbst mit einer schlechten Karte, den Weg zu finden. Die Bibliotheca liegt am oberen Ende der Spanischen Treppe. Gar nicht zu verfehlen. Kennt jeder.

Vor der Dachterrasse ist das alles zu überblicken. Alle Zusammenhänge erscheinen wie eine Aussage letzter Gültigkeit. Tanja Michalsky verweist auf jene Karten, auf denen Eco, Borges oder



Verschiedene Epochen im Blick: Tanja Michalsky beschäftigt sich in ihrer Forschung ebenso mit mittelalterlichen Stadtplänen wie mit Kinofilmen unserer Zeit.

Ende ihre fantastische, unerreichbare Idee einer totalen Repräsentation ausbreitet haben. Sie braucht sich nur umzudrehen, um vom weiten Horizont der Stadt wie durch einen Trichter hinab in die Maschinenräume der kunsthistorischen Forschung zu schauen.

ES HERRSCHT DIE ATMOSPHÄRE HEITERER KONZENTRATION

Vor acht Jahren hat der spanische Architekt Juan Navarro Baldeweg dort, genau über dem Garten des legendären Feldherrn und Gastgebers Lucius Licinius Lucullus aus der Zeit um 60 vor Christus, einen Neubau mitten in das Ensemble um den Palazzo Zuccari aus dem 16. Jahrhundert gefügt – von der Straße nicht zu sehen, aber geräumig genug für die rund 360000 Bände der Bibliothek, rund 870000 sorgsam konservierte und dokumentierte Fotografien der kunsthistorischen Sammlung und 90 großzügige, zu Terrassen geschichtete Arbeitsplätze. Immer sitzen Forscher dort. Es herrscht die Atmosphäre einer heiteren, gelösten Konzentration. Denn immer gilt die Regel: Kein Buch verlässt das Haus. Nie.

Die neue Direktorin kam, als das alles fertig war. Die Belastungen des Planens und Bauens haben ihre Vorgänger über sich ergehen lassen. Die Wissenschaftlerin weiß ihr Glück zu schätzen.

Sie kann sich fast ungestört wieder dem eigentlichen Zweck des Instituts zuwenden: die Geschichte der Kunst und der Kultur behutsam Schicht um Schicht freilegen. Dabei ihren Horizont erweitern, Begegnung fördern und Austausch anregen. Auch mit dem Max-Planck-Institut für Kunstgeschichte in Florenz ergeben sich neue Ebenen der Kooperation. Wissenschaft und Wissensbewegung können nicht mehr durch Grenzen definiert werden. Manchmal macht sie sich Sorgen, ob der großzügig bemessene Platz für die Depots nicht doch irgendwann knapp wird. „Wir müssen forschen“, sagt sie – und hadert dabei ganz leise mit dem Namen ihres Instituts, der bisweilen falsche Erwartungen weckt: „Wir sind keine Bibliothek, aber wir haben eine.“

Gerade hat sie Stefan Zweig wieder gelesen, die biografische Skizze des italienischen Kaufmanns und Seefahrers Amerigo Vespucci. Der habe zwar Amerika nicht entdeckt, schreibt der Historiograf – aber er habe erkannt, dass es Amerika war, was die Kartografen seiner Zeit noch zögernd und in Andeutungen hingetupft hatten. „Karten schaffen Räume“, bestätigt Tanja Michalsky. „Ihre Neutralität ist Fiktion.“ Und warnt vor der Präzision der Satellitenortung – denn auch deren Aufnahmen sind immer nur ein Abbild. Und also immer das Transportmittel für eine Erzählung. ◀

Eine Formel, die Flügel verleiht

Die Mathematikerin **Irmgard Flügge-Lotz** war eine der ersten Forscherinnen in der Luftfahrt- und Regelungstechnik. Am **Kaiser-Wilhelm-Institut für Strömungsforschung** gelang es ihr, die Konstruktion von Flugzeugen wesentlich einfacher berechenbar zu machen. Später berief die Stanford University Flügge-Lotz zu ihrer ersten Professorin in den Ingenieurwissenschaften. In den USA wird ihr Werk bis heute in Ehren gehalten. In Deutschland ist sie dagegen so gut wie vergessen.

TEXT **KATJA ENGEL**

Göttingen, 1931. Der führende Strömungsforscher Ludwig Prandtl staunt nicht schlecht. Seine Mitarbeiterin – mit 28 Jahren gerade mal halb so alt wie er – übergibt ihm die Lösung für ein mathematisches Rätsel, das mehr als zehn Jahre lang keiner knacken konnte. Es stand auf seinem „Speisezettel“, so nennt der Professor seine ungelösten Forschungsaufgaben. Das Resultat geht mit dem Namen der jungen Forscherin in die Aerodynamikforschung ein. Mit der Lotz-Methode ist es möglich, den Auftrieb an Tragflügeln von Flugzeugen vergleichsweise einfach zu berechnen.

Prandtl macht die Frau, die ihn so beeindruckt, bald zur (inoffiziellen) Abteilungsleiterin an der Aerodynamischen Versuchsanstalt (AVA), die zum Kaiser-Wilhelm-Institut für Strömungsforschung in Göttingen gehört. Es ist für Irmgard Lotz der Start in eine Karriere als international angesehene Aerodynamikerin und Regelungstechnikerin. Doch bis sie als erste Frau 1960 an der Stanford University den Professorentitel in den Ingenieurwissenschaften erhält, verläuft ihre wissenschaftliche Laufbahn alles andere als im Steilflug.

Irmgard Lotz wird am 16. Juli 1903 in Hameln geboren. Es ist das Jahr, in dem die Gebrüder Wright in den USA einen bedeutenden Meilenstein in der Luftfahrttechnik setzen. In einem Holzschuppen basteln die beiden Fahrradtechniker ihren „Flyer“, eines der ersten wirklich flugtauglichen motorisierten Flugzeuge. Damit treiben sie die Flugzeugentwicklung wieder ein Stück weiter, die damals mit beeindruckender Geschwindigkeit voranschreitet. Aber es ist noch die Ära der Tüftler. Eines schaffen die kühnen Pioniere der Lüfte nicht: zu erklären, was das für geheimnisvolle Kräfte sind, die ein Flugzeug, das einige Tausend Kilo schwerer als Luft ist, in die Höhe steigen lassen.

Zum Ende des Ersten Weltkrieges macht zwar auch die Luftfahrtforschung wesentliche Fortschritte, doch die sind eher theo-



Vorbild in Forschung und Lehre: Irmgard Flügge-Lotz war bei Kollegen wie bei Studierenden beliebt.

retischer Natur. Tragflächenprofile – ein wesentlicher Faktor im Flugzeugbau – lassen sich nur mit aufwendigen Windkanalmessungen testen. Ludwig Prandtl, der als Begründer der Flugzeug-Aerodynamik gilt, leistet zusammen mit seinem Göttinger Team Pionierarbeit bei der theoretischen Beschreibung des Auftriebs. Seine Tragflügeltheorie mathematisch zu berechnen, erweist sich jedoch als schwierig. 1919 gelingt es schließlich dem Göttinger Doktoranden Albert Betz, später Prandtls Nachfolger am Institut, den Auftrieb mit Differenzialgleichungen zu beschreiben. Aber seine Formeln zu berechnen, ist zu aufwendig, um damit auch praktisch neue Profile zu konstruieren. Immer noch sind teure Tests im Windkanal notwendig, die zeigen, wie die Strömungen an unterschiedlichen Flügelformen aussehen und wann Turbulenzen ausbrechen. Zusätzlich ist

es nötig, dass Rechnerinnen mit Rechenschiebern tagelang an der Lösung der Gleichungen arbeiten – damals eine klassische Frauenaufgabe. Insgesamt ist das Verfahren unerschwinglich für ein praktikables Flügeldesign.

Und so gelten die mathematischen Beschreibungen über zehn Jahre lang als das relevanteste Problem, das der praktischen Anwendung der Tragflügeltheorie entgegensteht. Bis Irmgard Lotz ihre Rechenmethode entwickelt und Prandtl zum Staunen bringt. „Ein fachkundiger Rechner kann die erforderlichen geraden und ungeraden Koeffizienten [...] in nur 2 ½ Stunden bestimmen“, schreibt sie in der ZEITSCHRIFT FÜR FLUGTECHNIK UND MOTORLUFTSCHIFFFAHRT, die ihre Methode publiziert. Es ist der lange gesuchte Lückenschluss zwischen Theorie und Praxis. Nun können die Konstrukteure beginnen, Tragflügel mit verbesserter Leistung vorzuberechnen.

Es hat sich für Prandtl gelohnt, Irmgard Lotz als einzige Frau 1929 in sein 25-köpfiges Team an der Aerodynamischen Versuchs-

anstalt aufzunehmen. Neu ist so eine Situation für diese nicht. Gerade erst hat sie als einzige Frau an der Technischen Hochschule Hannover die Promotionsurkunde zur Dr. ing. für angewandte Mathematik entgegengenommen. Ein Stellenangebot von der Stahlindustrie schlägt sie aus. Irmgard Lotz weiß, dass sie am Traum vom Fliegen mitwirken will, seit sie in ihrer Kindheit den Start von riesigen Zeppelinen aus nächster Nähe beobachtet hat. Später erinnert sie sich an einen Vorsatz, den sie noch vor ihrem Studium gefasst hatte: „Ich wollte ein Leben, das niemals langweilig ist, ein Leben, in dem immer wieder Neues geschehen sollte.“

Bald nach ihrer Anstellung am Kaiser-Wilhelm-Institut leitet die knapp 30-jährige Mathematikerin eine Gruppe von Wissenschaftlern und Rechnerinnen. Irmgard Lotz ist damit eine der wenigen Abteilungsleiterinnen der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft, wenn auch nur inoffiziell. Nach der Lotz-Methode forscht sie an weiteren mathematischen Lösungen für die Aerodynamik. Dann, 1937, schlägt Prandtl die begabte Frau als Forschungsprofessorin vor und stellt den entsprechenden Antrag beim Reichsluftfahrtministerium. In dem Brief führt er 13 Veröffentlichungen von ihr an. Doch der Antrag wird abgelehnt. Unter den herrschenden Nationalsozialisten sind Frauen in Führungspositionen unerwünscht.

1938 heiratet Irmgard Lotz den Ingenieurwissenschaftler Wilhelm Flügge und nimmt den Namen Flügge-Lotz an. Ernüch-

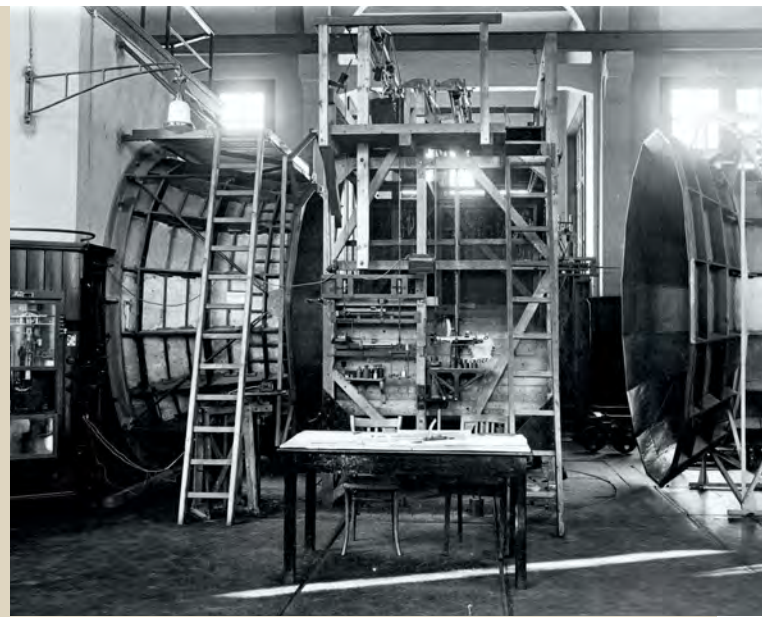
THE NEW YORK TIMES vom 23. Mai 1974



Als Autorin von mehr als 50 wissenschaftlichen Arbeiten – darunter eine Berechnung des Tragflächenauftriebs aus dem Jahr 1931, die einen Beitrag zum modernen Flugzeugbau leistete – hat Professor Flügge-Lotz noch im Ruhestand an Fragen der Satellitensteuerung, der Wärmeübertragung und des Luftwiderstands von schnellen Fahrzeugen gearbeitet.

tert von der Ablehnung als Forschungsprofessorin folgt sie ihrem Mann im selben Jahr nach Berlin-Adlershof. Er tritt an der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) eine Stelle als Abteilungsleiter an. Sie muss zurückstecken und bekommt eine Anstellung als „wissenschaftliche Beraterin für Aerodynamik und Dynamik des Fluges“. Flügge-Lotz nutzt die Zeit und schafft die Grundlagen für ein erstes Standardlehrbuch zur diskontinuierlichen Kontrolle. Ein zeitgenössischer Rezensent nennt es einen „bahnbrechenden Beitrag zur automatischen Kontrolltheorie“ – ein Fach, das damals noch in den Kinderschuhen steckt.

Doch der Aufenthalt von Irmgard Flügge-Lotz und Wilhelm Flügge in der damaligen Hauptstadt dauert nicht lange. Die Nationalsozialisten zetteln den Zweiten Weltkrieg an, 1940 fallen die ersten Bomben auf Berlin. Vor den schwersten alliierten Luftangriffen im Februar 1945 ist das Ehepaar zusammen mit einem Teil der DVL schon nach Saulgau nördlich des Bodensees umgezogen, eine weniger gefährdete Gegend. Nach der Kapitulation befinden



Luftiger Versuchsplatz: Im Göttinger Windkanal wurde die Strömung an Tragflügelprofilen getestet – bis die Lotz-Methode eine einfache Berechnung ermöglichte.

sie sich damit in der französischen Besatzungszone. Die Franzosen werben viele der Forscher nach Paris ab. Auch Wilhelm Flügge und Irmgard Flügge-Lotz wechseln ans Office national d'études et de recherches aérospatiales. Dort arbeiten sie gleichberechtigt als Forschungsgruppenleiter.

Obwohl beide in Paris glücklich sind, fehlen ihnen die Aufstiegsmöglichkeiten. 1948 nehmen sie Kontakt zur Stanford University in den USA auf, und Wilhelm Flügge erhält tatsächlich den Ruf auf eine Professur dort. Für Irmgard Flügge-Lotz ist der Umzug allerdings ein Rückschritt, sie wird lediglich als „Lecturer“, als Dozentin, angestellt – die niedrigste Kategorie in der Universitäts-hierarchie. Nach den Regeln in Stanford darf nur ein Ehepartner als Professor an der Universität tätig sein.

Das hindert Irmgard Flügge-Lotz jedoch nicht daran, in Lehre und Forschung wie eine Professorin zu arbeiten: Sie hält Vorlesungen und Seminare, betreut Doktoranden und treibt ihre Forschung voran – sowohl in der Strömungsmechanik als auch im Bereich der automatischen Steuerung. Für die Studenten und Kollegen ist es immer schwerer zu verstehen, warum die „Dozentin“ keine Professorin ist. Die gleiche Frage stellt sich im Sommer 1960 auf internationaler Bühne, als Flügge-Lotz auf dem ersten Kongress der International Federation of Automatic Control in Moskau die einzige weibliche Delegierte aus den Vereinigten Staaten ist. Kurz danach beruft sie die Stanford University zur ordentlichen Professorin für Technische Mechanik, Luft- und Raumfahrt.

In den darauffolgenden Jahren lehrt und forscht die außergewöhnliche Wissenschaftlerin unermüdlich weiter. Auch nach ihrer Emeritierung 1968 bleibt sie in der Forschung aktiv und wird vielfach geehrt: Das American Institute of Aeronautics and Astronautics ernennt sie zum Fellow – als erste Frau überhaupt. Die Society of Women Engineers verleiht ihr den Achievement Award, und die University of Maryland zeichnet sie mit der Ehrendoktorwürde aus. Nur in Deutschland ist sie so gut wie vergessen.

Als sie 1974 in Palo Alto in Kalifornien stirbt, erscheint sogar in der NEW YORK TIMES ein kurzer Nachruf. Und 2014, fast 40 Jahre später, würdigt die Stanford University sie posthum als eine von 35 „Engineering Heroes“, die den menschlichen, sozialen und wirtschaftlichen Fortschritt durch Technik und Wissenschaft vorangetrieben haben.



Urahn im Überblick

Johannes Krause mit Thomas Trappe, **Die Reise unserer Gene**, Eine Geschichte über uns und unsere Vorfahren

288 Seiten, Propyläen Verlag, Berlin 2019, 22,00 Euro

Wer sind wir? Und woher kommen wir? Auf diese uralten Menschheitsfragen gab es in letzter Zeit viele neue, überraschende Antworten – vor allem, was die vergangenen 600 000 Jahre unserer Geschichte angeht. So weiß man heute, dass in Europa bereits vor mehr als 420 000 Jahren Neandertaler lebten. Und dass diese Menschenart, auch wenn sie seit Langem ausgestorben ist, bis heute Spuren in unseren Genen hinterlassen hat. Und es gibt Erkenntnisse über eine Verwandtschaft zwischen Europäern und amerikanischen Ureinwohnern, obwohl der amerikanische Kontinent vom Osten Sibiriens aus besiedelt wurde.

Es ist der junge Forschungszweig der Archäogenetik, der immer mehr solcher Einsichten ermöglicht. Mittels DNA-Analysen sind die Wissenschaftler in der Lage, aus uralten menschlichen Knochen oder Zähnen – selbst aus winzigen Stückchen – herauszulesen, um welche Menschenart es sich handelt. Sie können Stammbäume erstellen und sogar Rückschlüsse darauf ziehen, wie lange eine menschliche Population Afrika bereits verlassen hat.

Pionier auf diesem Gebiet ist Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie, der unter anderem das Neandertaler-Genom entschlüsselt hat. Ebenfalls zu den führenden Archäogenetikern gehört Pääbos ehemaliger Schüler Johannes Krause, Direktor am Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte. Zusammen mit Kolleginnen und Kollegen aus ihren Instituten und in internationaler Kooperation entdecken die beiden Wissen-

schaftler immer mehr Details aus der Menschheitsgeschichte.

Diese vielen Puzzlestücke fügt Krause nun in *Die Reise unserer Gene* zu einem großen Bild zusammen. Das Buch vermittelt einen fundierten Überblick über die Entwicklung unserer Urahn von den ersten Menschen in Europa bis zur Bronzezeit. Demnach gab es drei große Einwanderungswellen auf unseren Kontinent, die sich bis heute in unseren Genen widerspiegeln: Die erste große Population moderner Menschen kam vor 40 000 Jahren, sie zogen als Jäger und Sammler umher. Vor rund 8000 Jahren begannen anatolische Bauern über den Balkan nach Europa einzuwandern; sie verdrängten teilweise die Jäger und Sammler, ansonsten hielten beide Gruppen an ihrer Lebensweise fest und lebten weitgehend getrennt. Vor rund 4800 Jahren kamen noch einmal neue Einwanderer: Hirten aus der Steppenregion nördlich des Schwarzen Meeres. Sie zogen in großer Zahl nach Europa und müssen hier auf teils menschenleere Gebiete getroffen sein. Möglicherweise waren viele der früheren Siedler einer Pestepidemie zum Opfer gefallen.

Zusätzlich zur Migrationsgeschichte gibt das Buch auch noch Einblicke in die Entwicklung der indoeuropäischen Sprachen. Und es zeichnet die Entwicklung und Ausbreitung berüchtigter Infektionskrankheiten wie der Pest, der Syphilis und der Tuberkulose nach.

Gemeinsam mit dem Journalisten Thomas Trappe ist es Johannes Krause gelungen, die Geschichte von der ersten bis zur

letzten Seite leicht lesbar, gut verständlich und spannend zu erzählen. Vorwissen benötigt man für die Lektüre kaum. Begriffe und grundlegendes Wissen etwa zum menschlichen Immunsystem werden auf farblich abgesetzten Seiten kurz erklärt, sodass man sie auch überspringen kann, wenn man die Erklärungen nicht braucht. *Die Reise unserer Gene* gibt zudem Einblicke in das wissenschaftliche Vorgehen: Die Methoden werden in Kürze erläutert, man erfährt von gegensätzlichen Thesen und früheren Fehlinterpretationen, sodass klar wird: Die Forschung geht nie geradlinig, es gab und gibt Sackgassen, widersprüchliche Erkenntnisse und verschiedene Deutungsmöglichkeiten.

Dabei bleibt das Buch nicht in der Vergangenheit stehen. Krause bezieht sowohl im Vorwort als auch im Schlusskapitel pointiert Stellung zur aktuellen Migrationsdebatte. Dabei stellt er klar: Wir alle haben einen Migrationshintergrund, denn unsere Vorfahren müssen zu irgendeiner Zeit von anderswo zugezogen sein. Auch wenn Einwanderung wohl nie konfliktfrei verlief – erst die Migration aus entfernten Gebieten hat uns zu dem gemacht, was wir heute sind: genetisch, aber auch sprachlich, kulturell und technisch. Der Versuch nationalistischer Propaganda, uns in Nationen zu separieren und voneinander abzuschotten, ist mit genetischen Unterschieden nicht begründbar. Dazu sind wir – nicht nur in Europa – viel zu eng miteinander verwandt. Mechthild Zimmermann



Im Reich von Nebra

Harald Meller, Kai Michel, **Die Himmelscheibe von Nebra**, Der Schlüssel zu einer untergegangenen Kultur im Herzen Europas

384 Seiten, Propyläen Verlag, Berlin 2018, 25,00 Euro

Gemeinhin heißt es, die Römer hätten die Kultur nach Mitteleuropa gebracht. Allenfalls den Kelten mit ihren stadähnlichen Hügelansiedlungen wird eine höhere Zivilisationsebene zugestanden. Harald Meller und Kai Michel legen nun in ihrem Buch eine überraschende These vor: Rund um die Saale zwischen Magdeburg, Erfurt und Leipzig existierte vor 4000 Jahren eine Hochkultur, möglicherweise inspiriert von Mesopotamien und Ägypten: das Reich von Nebra.

Heute ist davon kaum mehr etwas zu sehen. Lediglich einige – wenn auch imposante – Grabhügel zeugen davon, dass hier einmal Menschen gelebt haben, die ausgewählte Personen mit großem Aufwand bestatteten. Da es zudem keine schriftlichen Überlieferungen aus dieser Zeit gibt, deutete bis vor Kurzem nichts darauf hin, dass im heutigen Sachsen-Anhalt 400 Jahre lang eine Hochkultur bestand.

Das änderte sich, als zwei Raubgräber im Jahr 1999 eine Bronzescheibe mit Einlagen aus Gold entdeckten – die sogenannte Himmelscheibe von Nebra. Die weltweit älteste bekannte Darstellung des Firmaments machte weit über Fachkreise hinaus Furore. Für Archäologen erschien der Fund wie aus einer anderen Welt, denn aus dieser Zeit gab es bis dahin nichts annähernd Vergleichbares. Es schien unmöglich, dass Bauern und Viehhirten eine solche Meisterleistung der Schmiedekunst angefertigt haben konnten – von dem der Himmelsdarstellung zugrunde liegenden astronomischen Wissen ganz zu schweigen. Aber wer waren dann die Erschaffer der Himmelscheibe, und woher kamen sie?

Für Meller und Michel ist die Scheibe kein zufällig in der Erde von Mitteldeutschland vergrabener Schatz, sondern Höhepunkt einer Zivilisation, die um 2200 vor Christus aus der Verschmelzung zweier Kulturen entstand – jenen der sogenannten Linienbandkeramiker und der Glockenbecher. Wie die Teile eines Puzzles fügen sich dabei die geografische Lage, archäologische Funde und die Ergebnisse aus Erbgutanalysen zum Bild einer Gesellschaft, die zunächst auf den fruchtbaren Lössböden im Windschatten des Harzes wohlhabend geworden war. An den Knotenpunkten wichtiger Verkehrswege gelegen, konnten ihre Herrscher den Handel mit Bernstein und Metallen kontrollieren, so Reichtum anhäufen und dadurch mächtig werden. Von 2000 bis 1600 vor Christus bestimmten die Fürsten von Aunjetitz die Geschicke Mitteleuropas.

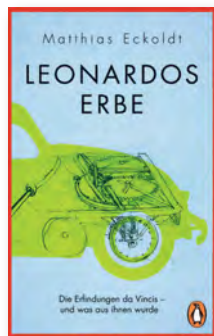
Die Autoren erzählen in ihrem Buch aber nicht nur die faszinierende Geschichte vom Aufstieg und Fall eines bisher unbekanntes Reichs in Mitteleuropa mit der Himmelscheibe als identitätsstiftendem Zentrum, von menschlichen und politischen Dramen bis hin zum Königsmord. Auch die Fundgeschichte der Scheibe liest sich wie ein Krimi. Harald Meller, Direktor des Landesmuseums für Vorgeschichte in Halle, ist es zu verdanken, dass der bis heute einzigartige Fund nicht für immer in den dunklen Kanälen des illegalen Handels mit Altertümern verschwunden ist.

Dass das Buch nicht nur archäologisch Interessierte begeistert, liegt auch an dem befruchtenden Austausch von Meller und seinem Koautor, dem Historiker und frühe-

ren Wissenschaftsredakteur bei der ZEIT, Kai Michel. Stück für Stück rekonstruieren die beiden aus alten und neuen Funden die Gesellschaft der Aunjetitz-Kultur und enthüllen dabei nebenbei eine ganze Serie von Grabräubern. Denn schon vor den beiden Raubgräbern, die – mit einer Metallsonde ausgestattet – zufällig auf die Himmelscheibe gestoßen sind, hofften auch andere auf den großen Fund.

So ließ möglicherweise schon der Magdeburger Erzbischof im 12. Jahrhundert den Bornhöck bei Dieskau an der Saale plündern, den mit 15 Meter Höhe und 65 Meter Durchmesser größten Grabhügel der Region. Die Autoren meinen, der Bornhöck müsse die Grabstätte eines ganz besonderen Herrschers von Nebra gewesen sein: eine Pyramide des Nordens also für den ersten König Mitteleuropas.

Geschickt verweben Meller und Michel die verschiedenen Zeitebenen von der Aunjetitz-Kultur bis hin zu den Raubgräbern des Mittelalters und der Neuzeit. In verständlichem Stil sowie mit beeindruckenden Farbfotos, Zeichnungen und Erklärgrafiken entreißen sie eine zuvor unbekanntes Zivilisation im Herzen Europas dem Nebel der Geschichte. Das Reich von Nebra und das Schicksal der Herrscher der Himmelscheibe werden dabei so lebendig, dass man am Ende der Lektüre eigentlich nur von einem enttäuscht ist: dass man nicht noch mehr über sie weiß. Harald Rösch



Das entzauberte Genie

Matthias Eckoldt, **Leonardos Erbe**, Die Erfindungen da Vincis – und was aus ihnen wurde

320 Seiten, Penguin Verlag, München 2019, 12,00 Euro

Es wäre sinnlos, danach zu fragen, welche Talente Leonardo da Vinci alle hatte. Bekannt ist er den meisten als genialer Maler. Aber er gilt auch als Naturforscher, Kriegsmaschinenerfinder, Architekt, Kanalbauer oder Luftingenieur. Leonardo ist ein Querdenker, ein Universalgelehrter, der als Autodidakt keine Paradigmen der Wissenschaft überwinden muss. Er denkt und forscht eigenständig. Doch ist er wirklich der epochale Geist, der das U-Boot, den Hubschrauber, das Auf-dem-Wasser-Laufen, die Kanalbaumaschine oder die Druckerpresse erfunden hat?

Der Buchautor Matthias Eckoldt lässt keinen Zweifel daran, dass er von diesem Geniekult nichts hält. Den Beweis tritt er an, indem er die technischen Wunderwerke auf Funktionsfähigkeit prüft. Je nach Themengebiet Wasser, Luft, Krieg und Kraft nimmt er die Erfindungen auseinander.

Am meisten ärgert den Medienwissenschaftler, dass Leonardo von politischen Machthabern instrumentalisiert wurde. Denn erst im 20. Jahrhundert macht vor allem der italienische Diktator Benito Mussolini den genialen Maler zum Technikgott, um seine eigenen Großmachtfantasien zu stärken. So befahl er die Ausrichtung einer Ausstellung, in der Leonardos Werk die gewaltige Schöpferkraft des italienischen Volkes repräsentieren sollte. Eine Propagandamaschinerie lief an, und die Diktatur strickte die gewünschte Legende. Als die Faschisten abtraten, ging der Geniekult um Leonardos Erbe nahtlos in die kommerzielle Nutzung über. Aber auch die Wissenschaft ließ sich verleiten,

die visionäre Kraft Leonardos zu überschätzen. Davon jedenfalls ist der Autor fest überzeugt.

Einen Grund lieferte Leonardo wahrscheinlich selbst. Er malte mit solcher Kraft, Präzision und Lebendigkeit, dass sogar eine hingeworfene Skizze vollendete Technik suggerierte. Doch Eckoldt führt mit technischen Überlegungen vor, oft auch unterstützt mit computersimulierten Modellen, dass fast keine dieser Konstruktionen funktioniert hätte: Er beschreibt Panzer, die Schlangenlinien fahren würden, Luftflugschrauben, die trotz großen Kraftaufwands bloß Leerlauf und kein Abheben ermöglichen, oder ein Schaufelradboot, dessen Zahnräder die Richtung wechseln, weshalb das Boot so nicht vom Fleck kommen würde.

Vieles hat Leonardo kopiert, etwa die Druckerpresse, deren Idee von Gutenberg stammt, oder die Schaufelräder, die schon ein römischer Architekt beschrieben hatte. Skizzen abzuzeichnen war Leonardos Art, Neues zu lernen und zu verbessern. Manchmal wünscht man sich, der Autor wäre etwas nachsichtiger gewesen. Denn es gibt viele unfertige Skizzen oder unausgegorene Ideen, von 20000 Blättern sind nur 6000 übrig geblieben. Und eine Community, die sich mittels Open Access austauscht, gab es damals noch nicht.

Doch auch wenn Eckoldt das vermeintliche Technikgenie entmystifiziert, entsteht doch ein liebevolles Porträt eines ruhelosen Menschen, eines kreativen Genies. Was Leonardo fesselt, ist das, was sich im Innern verbirgt: Nicht die ruhige

See interessiert ihn, er studiert die wilden Wirbel und Strudel eines Gewässers. Um zu wissen, wie der Mensch unter der Haut aussieht, seziiert Leonardo selber viele Leichen. Und so ist er seiner Zeit um Jahrhunderte voraus, als er erkennt, dass es einen Blutkreislauf gibt: Laut der damals vorherrschenden Meinung fließt der rote Lebenssaft nur in eine Richtung, wird verbraucht und immer wieder neu gebildet.

Was bleibt nach dem vernichtenden Faktencheck seiner Erfindungen? Matthias Eckoldt stimmt auf den letzten Seiten einen Lobgesang an. Ein leidenschaftliches Plädoyer – nicht auf das vermeintliche Erfindergenie, sondern auf einen Menschen, der neue Räume des Wissens aufstößt, der mit seiner unstillbaren Neugier so vieles hartnäckig hinterfragt und sich nicht mit Lehrmeinungen zufriedengibt. Der ein Denken stark macht, das mehr als die kalte und technische Logik des Machbaren kennt und den Menschen in den Mittelpunkt stellt. Der keine Angst hat, wild zu spekulieren oder auch mal eine Arbeit unvollendet fallen zu lassen. Da entsteht beim Lesen der Wunsch, dass man zu gerne diesen Leonardo persönlich kennengelernt hätte.

Katja Engel



Ein riesiger Sprung

Am 25. Mai 1961 hielt US-Präsident John F. Kennedy vor dem Kongress eine bemerkenswerte Rede mit einer gewagten Aussage: „Ich glaube, dass diese Nation sich das Ziel setzen sollte, noch vor dem Ende des Jahrzehnts einen Menschen auf den Mond zu schicken und ihn sicher wieder zur Erde zurückzubringen.“ Das befeuerte ein Wettrennen, das längst lief: Dreieinhalb Jahre zuvor hatte die UdSSR mitten im Kalten Krieg erfolgreich einen Satelliten namens *Sputnik 1* gestartet.

Als die USA aus ihrer Schockstarre erwacht waren, galt es, dem etwas entgegenzusetzen und technische Überlegenheit zu demonstrieren. Für einen derartigen Machtkampf der politischen Systeme bot sich das vergleichsweise junge Gebiet der Raumfahrt geradezu an. Und tatsächlich sollte die Vision Präsident Kennedys wahr werden: Am 21. Juli 1969 um 3.56 Uhr und 20 Sekunden mitteleuropäischer Zeit setzt der Amerikaner Neil Armstrong seinen Fuß in den feinen Staub des Mondes. Mit diesem „riesigen Sprung für die Menschheit“ entscheiden die USA das Wettrennen gegen die UdSSR endgültig für sich.

In seinem Buch *'69* lässt der Journalist Ulli Kulke das Drama der Mondlandung, spannend erzählt, Revue passieren. Allerdings fokussiert sich der Autor auf die Mission *Apollo 8*, mit der das Projekt in die entscheidende Phase trat, der Titel müsste eigentlich *'68* lauten. Trotzdem ist es wert, den Flug des Raumschiffs ausführlich zu schildern, denn die Astronauten Bill Anders, Jim Lovell und Frank Borman verließen als erste Menschen das Schwerefeld der Erde und schwenkten am 24. Dezember 1968 in eine Umlaufbahn um den Erdtrabanten ein. Kurz darauf sollte ein ikonisches Foto entstehen: Als ihre Kapsel zum dritten Mal die Mondrückseite überflog, sahen die Männer

an Bord die Erde über dem Horizont aufgehen – und griffen zur Kamera.

Mit großer Akribie beschreibt Kulke die Entstehung dieses einzigartigen Bildes, des meistkopierten aller Zeiten. Jeder der drei Astronauten erzählte im Nachhinein seine eigene Version, wer denn nun diese Aufnahme geschossen habe. Im vorliegenden Buch ist der Funkverkehr wörtlich wiedergegeben – woraus sich schließen lässt, dass Bill Anders im entscheidenden Moment auf den Auslöser drückte.

Es sind solche Szenen, die das Buch zu einer Fundgrube für Raumfahrtenthusiasten machen. Überhaupt versteht es der Autor hervorragend, im Stil einer Reportage viele Details zu beschreiben, etwa die Tatsache, dass die Ehefrauen der Astronauten zu Hause über eine sogenannte Squawk-Box den Funkverkehr zwischen *Apollo* und dem Kontrollzentrum in Houston mithören konnten. Oder dass es durchaus auch mal Streit an Bord oder in der Kommunikation mit der Erde gab.

Wer sich einen schnellen, gleichwohl fundierten Überblick über das gesamte *Apollo*-Projekt verschaffen möchte, ist im Buch mit dem gleichnamigen Titel bestens aufgehoben. Der Autor Thorsten Dambeck, Wissenschaftsjournalist und freier Mitarbeiter auch von MAXPLANCKFORSCHUNG, versteht es ausgezeichnet, die einzelnen

Missionen übersichtlich zusammenzufassen, ohne wesentliche Fakten wegzulassen. Selbstverständlich geht es zunächst auch in diesem Buch um die Vorgeschichte des Wettlaufs zum Mond und – in aller Kürze – um die Beiträge der Sowjets, deren Sonde *Luna 3* im Oktober 1959 erstmals die Rückseite des Mondes fotografierte.

Der Teil über *Apollo* beginnt mit einer Beschreibung der *Saturn V*, der mit 160 Millionen PS stärksten und mit 110 Metern höchsten bisher gebauten Rakete. Ihren Jungfernflug erlebte sie am 9. November 1967 mit einer später als *Apollo 4* bezeichneten unbemannten Mission. Höhepunkt des Programms war natürlich die Landung von Neil Armstrong und Buzz Aldrin im Juli 1969. Dem einen oder anderen haben sich diese Momente sicher ins Gedächtnis eingebrannt, als über die Mattscheibe des heimischen Schwarz-Weiß-Fernsehers die wagemutigen Astronauten als geisterhafte Schemen schwebten.

Thorsten Dambeck lässt diese Erinnerungen aufleben. Und wer damals noch gar nicht geboren war, bekommt einen plastischen Eindruck von den Meilensteinen dieses Abenteuers im All. Dazu tragen ganz wesentlich die vielen Originalfotos bei, die eine der Stärken des großformatigen Buchs sind. Es endet mit einem informativen Blick in die Mondforschung und in die Zukunft der lunaren Raumfahrt. Helmut Hornung

Die besprochenen Bücher

- Ulli Kulke, **'69**, Der dramatische Wettlauf zum Mond; 240 Seiten, Verlag LangenMüller, Stuttgart 2018, 22,00 Euro
- Thorsten Dambeck, **Das Apollo-Projekt**, Die ganze Geschichte – mit Originalaufnahmen der NASA; 160 Seiten, Kosmos Verlag, Stuttgart 2019, 19,99 Euro



Der Satellit im Gebüsch

James Donovan, **Apollo 11**, Der Wettlauf zum Mond und der Erfolg einer fast unmöglichen Mission

544 Seiten, Deutsche Verlags-Anstalt, München 2019, 28,00 Euro

Am Morgen des 2. Mai 1945 radelt der 22-jährige Magnus von Braun mit einem weißen Taschentuch am Lenker einen Bergpfad in den bayerischen Alpen hinunter. Er begegnet einem Panzertrupp der US-Armee und teilt einem einfachen Soldaten mit, dass die Erfinder der V2 sowie sein Bruder Wernher gern zu General Dwight Eisenhower gebracht werden wollten. Tatsächlich werden die Deutschen vom amerikanischen Geheimdienst aufgenommen. Nach einigen Wochen werden Wernher von Braun und 126 weitere Raketenforscher in die USA überstellt – die auf diese Weise den Keim für den Sprung in den Weltraum legen.

Diese Geschichte erzählt James Donovan im Buch *Apollo 11* und packt damit sein Thema an den Wurzeln. Denn der Autor ist weit davon entfernt, sich auf den Titel zu beschränken, vielmehr schildert er eine umfassende und minutiös recherchierte Geschichte des Raumfahrtzeitalters, das in einem utopisch anmutenden Großprojekt gipfelte. Bis zu 400 000 Menschen arbeiteten an dem *Apollo*-Programm, das genau genommen schon in den 1950er-Jahren begann – zunächst mit einem Fehlschlag.

Eine Rakete vom Typ *Vanguard* sollte am 6. Dezember 1957 einen knapp zwei Kilogramm schweren Satelliten in den Erdorbit bringen. Die ganze Nation verfolgte live im Fernsehen, wie die Rakete einen Meter abhob, auf die Startrampe in Cape Canaveral zurückfiel und in einem orange-gelben Feuerball explodierte. „Der Satellit von der Größe einer Grapefruit fiel von der Ra-

ketennase und rollte in ein Gebüsch, von wo aus er Signale zu senden begann“, schreibt Donovan über das schmachliche Ende der Mission.

Tatsächlich gingen zehn von zwölf Starts der *Vanguard* schief, und die USA setzten auf einen anderen Typ, der unter Leitung von Wernher von Braun entwickelt worden war und auf der *Jupiter-C* genannten Rakete basierte. Damit wurde am 1. Februar 1958 mit *Explorer 1* der erste US-amerikanische Satellit ins All geschossen. Ein paar Monate später wurde die National Aeronautics and Space Administration gegründet, kurz NASA genannt. Jetzt kam der Wettlauf ins All erst richtig in Fahrt.

James Donovan schildert im Folgenden die Flüge des *Mercury*-Programms – in einer solchen Kapsel erreichte Alan Shepard am 5. Mai 1962 eine Höhe von 187 Kilometern und wurde zum ersten Amerikaner im Weltraum. Um diesen Titel, so erfährt man, lieferte sich Shepard mit seinem Konkurrenten John Glenn einen regelrechten Wettkampf: „Shepard begann mit dem Gewichtheben und gab für eine Weile das Rauchen auf.“ Glenn, ebenso wie Shepard Mitglied der legendären Astronautencrew „Mercury Seven“, unterlag zwar, wurde wenig später aber zum ersten Amerikaner, der die Erde auf einem Raumflug umkreiste.

Solche Geschichten, an den Menschen entlang erzählt, machen das Buch überaus lesenswert. Man bekommt dadurch Einblick in Psyche und Befindlichkeiten der Akteure, kann Anteil nehmen an persönlichen Triumphen, aber auch an Tragö-

dien wie dem Feuer in der Kapsel von *Apollo 1*, bei dem alle drei Astronauten zu Tode kamen.

Geschickt bettet der Autor das Schicksal Einzelner in das große Ganze ein und beschreibt damit auch ein Stück neuester Geschichte. Dabei richtet er immer wieder den Blick nach Osten und schildert die Entwicklung der Raumfahrt in der Sowjetunion, die – als Gegenspieler zu Wernher von Braun – eng mit dem genialen Raketeningenieur Sergei Koroljow verknüpft ist. Als Neil Armstrong den Mond betrat, war Koroljow schon dreieinhalb Jahre tot, das russische Mondprogramm längst gescheitert. Den USA war etwas gelungen, was selbst Insider nicht für möglich gehalten hatten: In der Nacht vor seinem Flug mit *Apollo 11* berechnet Armstrong seine Chancen, gesund zur Erde zurückzukehren. Er kommt auf 50 Prozent... Helmut Hornung

Standorte

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

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

- Jupiter, Florida

Brasilien

- Manaus

Luxemburg

- Luxemburg



MAX PLANCK
GESELLSCHAFT



Impressum

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

Redaktionsanschrift

Hofgartenstraße 8
80539 München
Telefon: 089 2108-1719 / -1276 (Fax: -1405)
E-Mail: mpf@gv.mpg.de
Internet: www.mpg.de/mpforschung
Kostenlose App: www.mpg.de/mpf-mobil

Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung

Peter Hergersberg (Chemie, Physik, Technik; -1536)
Helmut Hornung (Astronomie; -1404)

Redaktion

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

Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)

Gestaltung

Julia Kessler, Sandra Koch
Voßstraße 9
81543 München
Telefon: 089 2781 8770
E-Mail: projekte@designergold.de

Litho

KSA Media GmbH
Zeuggasse 7
86150 Augsburg

Druck & Vertrieb

Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg

Anzeigenleitung

Beatrice Rieck
Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg
Telefon: 0931 4600-2721 (Fax: -2145)
E-Mail: beatrice.riECK@vogel-druck.de

MAXPLANCKFORSCHUNG berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den **Max-Planck-Instituten** und richtet sich an ein breites wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemeinverständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (**MAXPLANCKRESEARCH**) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr; die Auflage dieser Ausgabe beträgt 85 000 Exemplare (**MAXPLANCKRESEARCH**: 10 000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in **MAXPLANCKFORSCHUNG** vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der **Max-Planck-Gesellschaft** und ihrer Organe interpretiert werden.

Die **Max-Planck-Gesellschaft** zur Förderung der Wissenschaften e.V. unterhält 86 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 23 400 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6 700 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2018 umfasste insgesamt 1,8 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.

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

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



Forschung leicht gemacht.

Schafft die Papierstapel ab!

Das Magazin der Max-Planck-Gesellschaft
als ePaper: www.mpg.de/mpf-mobil

Internet: www.mpg.de/mpforschung

Kostenlos
downloaden!



MAX PLANCK
GESELLSCHAFT





Gefällt Ihnen, was Sie lesen?

Viermal jährlich berichtet **MAXPLANCKFORSCHUNG** über die wissenschaftliche Arbeit an den Instituten der Max-Planck-Gesellschaft.

Jetzt forschen wir selbst – nach Ihrer Meinung.

Bitte nehmen Sie sich fünf Minuten Zeit, und füllen Sie unseren **Online-Fragebogen** aus. So helfen Sie dabei, das Wissenschaftsmagazin stetig zu verbessern und das Lesevergnügen zu erhöhen.

Herzlichen Dank
für Ihre Unterstützung!

Online bis zum
21. Juli 2019

Den Fragebogen finden Sie unter
<https://mpf2019.de/goto/Umfrage>

