

Ausgabe 03 | 2021

MAX PLANCK

Forschung

DEMOGRAFIE

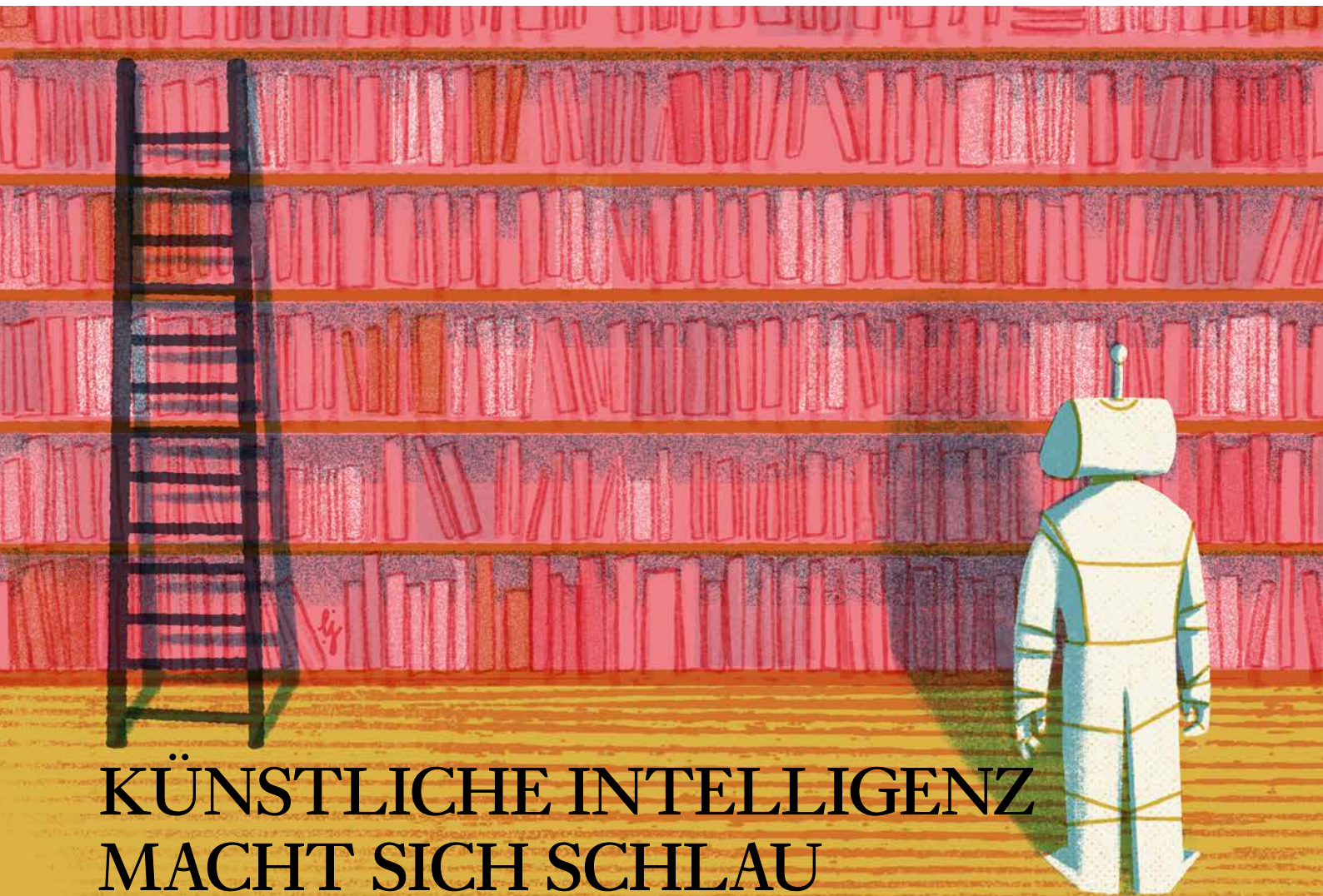
Volkszählung per Facebook

ENERGIE

Treibstoff aus dem Stahlwerk

ASTRONOMIE

Das dunkle Herz von Centaurus A



KÜNSTLICHE INTELLIGENZ MACHT SICH SCHLAU



ILLUSTRATION: LUISA JUNG FÜR MPG

Lernen, lernen, lernen: Computer können zwar besser rechnen als Menschen, doch an Weltwissen und grundlegenden Erkenntnissen über Zusammenhänge mangelt es ihnen bislang. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten daran, dass künstliche Intelligenz in Zukunft mehr den menschlichen Anforderungen entspricht.

EDITORIAL

Liebe Leserin, lieber Leser

Künstliche Intelligenz schlägt heute die Leistungen selbst der klügsten Menschen – und ist doch jedem Kleinkind unterlegen. Denn Programme, die mit Methoden des maschinellen Lernens arbeiten, zeichnen sich durch eine extreme Inselbegabung aus. Vor allem wenn es um die Erkennung komplexer Muster in großen Datenmengen geht, ist künstliche Intelligenz kaum zu übertreffen. Sie findet daher zunehmend Anwendung in der Medizin. So lassen sich Algorithmen darauf trainieren, anhand einer Vielzahl physiologischer Kenngrößen und klinischer Befunde das Risiko für psychische Erkrankungen abzuschätzen.

3

Doch für alle Aufgaben außerhalb ihres Spezialgebiets sind Algorithmen völlig unbrauchbar. Und wie sie zu ihren Einschätzungen gelangen, ist oft nicht nachvollziehbar. Das liegt nicht zuletzt daran, dass die Programme die Zusammenhänge, die sie aufdecken, selbst nicht verstehen – ganz zu schweigen von einem Verständnis für die Welt um sie herum, wie es schon kleine Kinder haben.

Forschende entwickeln Algorithmen jedoch inzwischen so weiter, dass zumindest erkennbar wird, welche Kriterien sie für ihre Entscheidungen heranziehen – eine absolute Notwendigkeit gerade in der Medizin, aber auch bei der Kreditvergabe, im Straßenverkehr und in anderen Bereichen, in denen das Urteil künstlicher Intelligenz weitreichende Folgen für Menschen hat. Hier wird deutlich, welche ethischen Fragen sich stellen, wenn Algorithmen Entscheidungen für und über uns treffen. Die Kriterien dafür auszuloten, ist daher ebenfalls Thema der Forschung. Schließlich sollten wir Menschen den Algorithmen vorschreiben, was sie dürfen und was nicht.

Der Schwerpunkt dieses Hefts will in Sachen künstliche Intelligenz einige Denkanstöße geben. In diesem Sinne eine anregende Lektüre!

Ihr Redaktionsteam



BILDER: LUISA JUNG FÜR MPG (LINKS OBEN), MOHAMAD ALMEDAWAR/MPG FÜR MOLEKULARE ZELLBIOLOGIE UND GENETIK (RECHTS OBEN), ISTOCK/DMYTRO VARAVIN (LINKS UNTEN), PICTURE ALLIANCE / JOCHEN TACK (RECHTS UNTEN)

38 | ERKENNEN

Eine Software soll dabei helfen, psychiatrische Krankheiten zu diagnostizieren.

52 | ERKUNDEN

Unter dem Mikroskop zeigen sich in Zellen rätselhafte Bläschen, die nun erforscht werden.

58 | ERFASSEN

Handydaten sind eine wertvolle Quelle für Statistiken zur Bevölkerungsentwicklung.

64 | ERSETZEN

CO₂ könnte sich künftig statt Erdöl als Rohstoff für Chemierprodukte nutzen lassen.

03 | EDITORIAL

06 | ORTE DER FORSCHUNG

GEO600 bei Hannover



08 | NOBELPREISE 2021

10 | KURZ NOTIERT

16 | ZUR SACHE

Der Waldbau braucht frische Wurzeln

Ein interdisziplinäres Institut könnte wissenschaftliche Erkenntnisse liefern, wie der Wald zukünftig gestaltet werden kann, um die fortschreitende Erderwärmung auszuhalten.

22 | INFOGRAFIK

Viele Stimmen im Vogelchor

IM FOKUS

Künstliche Intelligenz macht sich schlau

24 | Nicht ohne Grund!

Künstliche Intelligenz erkennt Muster schon lange viel besser als wir. Um aber ihren Namen wirklich zu verdienen, müsste sie auch kausale Zusammenhänge verstehen.

32 | Wenn Maschinen mitmischen

Immer öfter treffen wir im Alltag auf künstliche Intelligenz. Wie aber verhalten sich Menschen, wenn sie mit intelligenten Maschinen zu tun haben? Und was erwarten sie von ihrem künstlichen Gegenüber?

38 | Eine Software scannt die Psyche

Nur schlapp oder schon depressiv? Die Symptome psychiatrischer Erkrankungen sind nicht immer eindeutig. Bei der Früherkennung könnte der Einsatz von künstlicher Intelligenz hilfreich sein.

44 | BESUCH BEI

Charlotte Grosse Wiesmann
Vom Gestirn zum Gehirn

50 | ZWEITER BLICK

WISSEN AUS

52 | Tröpfchen in der Zellsuppe

Jahrzehntlang interessierte sich niemand für die Bläschen, die unter dem Mikroskop in Zellen erscheinen. Jetzt werden diese rätselhaften Phänomene näher untersucht.

58 | Volkszählung per Facebook

Mehr als ein Drittel der Weltbevölkerung nutzt Facebook mindestens einmal im Monat. Aus den dabei gesammelten Daten lassen sich Migrationsströme nachvollziehen und Trends erkennen.

64 | Treibstoff aus dem Stahlwerk

Rund sechs Prozent des weltweiten CO₂-Ausstoßes stammen aus der Stahlindustrie. Forschende untersuchen die Nutzung des Treibhausgases als Rohstoff für Chemieprodukte.

72 | Zoom ins Herz von Centaurus A

Im Zentrum einer fernen Milchstraße steckt ein supermassereiches schwarzes Loch. Jetzt ist ihm das Event Horizon Telescope so nahe gekommen wie niemals zuvor.

78 | POST AUS...

Melbourne, Australien

80 | NEU ERSCHIENEN

82 | FÜNF FRAGEN

Zu genetisch veränderten Mücken

83 | IMPRESSUM

GEOMAX

Wetter extrem – wenn sich Hitzewellen, Stürme und Starkregen häufen



6 **W**er die Musik des Universums belauschen möchte, der braucht feine Instrumente. Etwa solche, wie sie in LIGO stecken. Als diese beiden US-amerikanischen Detektoren am 14. September 2015 als Erste überhaupt eine Gravitationswelle registrierten, war auch die Freude in Ruthe riesig. Denn nahe dem Dorf bei Hannover steht ebenfalls eine Falle für die von Albert Einstein vorhergesagten Kräuselungen der Raumzeit. In der Anlage GEO600 testen Forschende – unter anderem des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik – neue Techniken, die dann in anderen, größeren Detektoren weltweit zum Einsatz kommen.

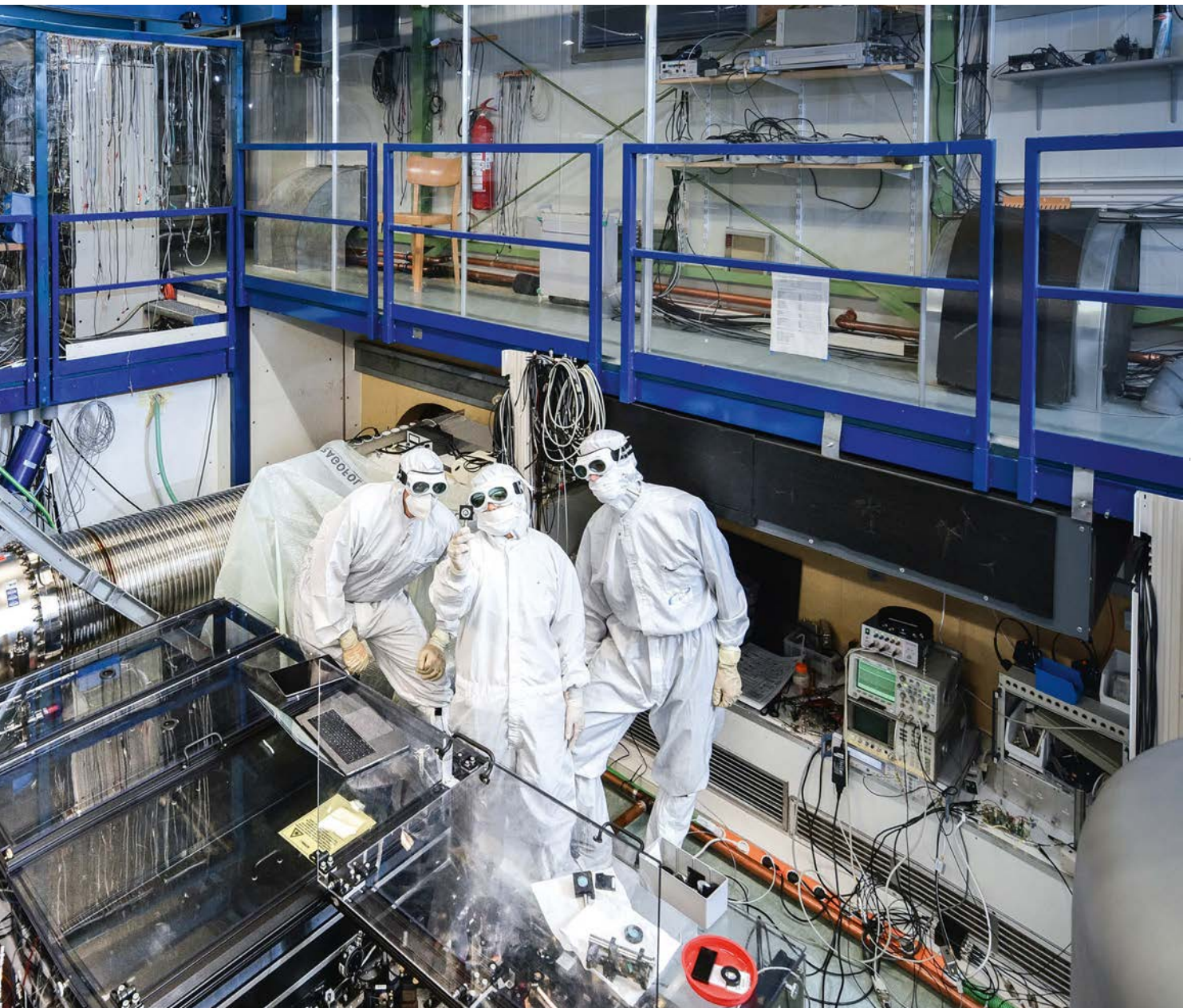
Alle diese Instrumente arbeiten nach dem Prinzip der Interferometrie: Eine Optik spaltet Laserlicht in zwei Strahlen auf, die anschließend im rechten Winkel zueinander weiterlaufen. Am Ende der beiden Rennstrecken reflektieren Spiegel die Lichtstrahlen und bringen sie schließlich zur Überlagerung. Aus dem so entstandenen Interferenzmuster lässt sich erkennen, ob eine Gravitationswelle durch die Anlage geschwappt ist. Derartige Messungen sind überaus diffizil, und so gleicht das Innere von GEO600 einem Reinraum in einem virologischen Labor. Das Tragen von Schutzbrillen und speziellen Anzügen ist Pflicht, denn kein Staubkörnchen darf die empfindlichen Messungen stören.

Das Laserlicht verläuft in zwei 600 Meter langen Edelstahlrohren, die zusammen mit dem Tank (links im Bild) zu einem ausgeklügelten Vakuumsystem gehören. Der optische Tisch vor den drei Forschenden erzeugt Quetschlicht. Dieses ist einer der Tricks, um die Empfindlichkeit eines Gravitationswellen-Detektors zu erhöhen. Es reduziert das störende Quantenrauschen des Laserlichts um den Faktor 2! Damit hält GEO600 den Weltrekord.

*WELTREKORD
IM REINRAUM*



ORTE DER FORSCHUNG



7
FOTO: FRANK VINKEN FÜR MPG

NOBELPREIS FÜR CHEMIE



BENJAMIN LIST

Linke oder rechte Hand? Das macht auch in der Chemie einen großen Unterschied. Viele Moleküle, vor allem solche, die in biologischen Prozessen mitmischen, existieren in zwei Varianten, deren Bestandteile wie die Finger unserer Hände spiegelbildlich angeordnet sind.

8

Bei chemischen Reaktionen entstehen die beiden Varianten gewöhnlich zu gleichen Anteilen, in der Biologie wirken sie aber meist sehr unterschiedlich. Das spielt nicht zuletzt bei medizinischen Wirkstoffen eine Rolle. Benjamin List, Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr, und David W. C. MacMillan von der Universität Princeton haben im Jahr 2000 unabhängig voneinander festgestellt, dass auch relativ kleine, oft kostengünstige und ungiftige organische Moleküle eine chemische Reaktion ausschließlich zu einer Variante steuern können. Dafür erhalten sie den Nobelpreis für Chemie 2021. Vor der Entdeckung der beiden Forscher war die selektive Wirkung nur von Enzymen bekannt oder von aufwendig gebauten Katalysatoren, die oft teure oder giftige Metalle enthalten.

Als Benjamin List zum ersten Mal die katalytische Wirkung eines organischen Moleküls, nämlich der Aminosäure Prolin, testete, war er

eher skeptisch: „Ich war total unsicher. Man denkt ja nicht: Ha! Das hab ich designt! Und nun werde ich weltberühmt! Nein, eher: Hmm ... Vielleicht war das eine ganz doofe Idee. Andere haben das sicher schon probiert und wissen auch, warum es nicht klappt ...“ Doch das hatte noch keiner ausprobiert, und es klappte. Heute werden organische Moleküle nicht nur in der Forschung, sondern

auch in der Industrie oft als Katalysatoren eingesetzt.

„Benjamin List hat ein neues Kapitel der Katalyse mit großem Anwendungspotenzial aufgeschlagen“, sagt Max-Planck-Präsident Martin Stratmann. „Es ist ihm erstmalig gelungen, organische Katalysatoren mit hoher Stereoselektivität zu entwickeln – ein Durchbruch, wie man ihn selten erlebt.“



FOTO: FRANK VINKEN

„Man denkt: Vielleicht war das eine ganz doofe Idee.“

NOBELPREIS FÜR PHYSIK

KLAUS
HASSELMANN



FOTO: PICTURE ALLIANCE / DPA | J.J. GUILLEN



„Wir warnen seit fast 50 Jahren
vor dem Klimawandel.“

Ohne Provokation geht es oft nicht, gerade in der Wissenschaft: Klaus Hasselmann forderte mit seinen Arbeiten die Klimaforschung heraus – und legte so die Grundlage für die Erkenntnis, dass sich die Erderwärmung heute eindeutig auf die Zunahme von CO_2 in der Atmosphäre zurückführen lässt. Dafür erhält der ehemalige Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie gemeinsam mit Syukuro Manabe aus den USA

und Giorgio Parisi aus Italien den Nobelpreis für Physik 2021.

Klaus Hasselmann verschaffte dem Zufall Eingang in die Klimaforschung. Er betrachtete die langfristigen Entwicklungen des Klimas gewissermaßen als Ergebnis des meteorologischen Rauschens, als das sich die kurzfristigen Wetterschwankungen begreifen lassen. So hatte vor ihm noch niemand auf das Klima geblickt. Zudem entwi-

ckelte er das mathematische Werkzeug, mit dem sich der Fingerabdruck des menschlichen CO_2 -Ausstoßes im Wetterrauschen nachweisen lässt.

„Als Gründungsdirektor unseres Max-Planck-Instituts für Meteorologie hat er mit seinen Kollegen in Hamburg die Erdsystemforschung in Deutschland in den 1970er- und 1980er-Jahren maßgeblich vorangetrieben und international anschlussfähig gemacht“, sagt Max-Planck-Präsident Martin Stratmann.

Um die Erkenntnisse der Klimaforschung in die Gesellschaft zu tragen und wirkungsvolle, aber auch praktikable Maßnahmen gegen den Klimawandel zu entwickeln, gründete Klaus Hasselmann gemeinsam mit Carlo C. Jaeger vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung das heutige Global Climate Forum. „Es gibt viele Dinge, die wir tun können, um den Klimawandel zu bremsen“, sagt Hasselmann, der am ehemaligen Max-Planck-Institut für Strömungsforschung promovierte und ab 1975 das Max-Planck-Institut für Meteorologie mit aufbaute. „Die Frage ist aber, ob Menschen erkennen, dass wir jetzt handeln müssen, um etwas zu stoppen, das in zwanzig oder dreißig Jahren eintreten wird.“

60 000

Jahre können Forschende mithilfe der Sedimentbohrkerne aus Eifelmaaren in die Klimaschicht zurückblicken.

EIFELMAARE SAGEN STARKREGEN VORHER

MILCH ERMÖGLICHTE MIGRATION

10 Vor mehr als 5000 Jahren breiteten sich die Jamnaja, ein Hirtenvolk aus der eurasischen Steppe, über weite Gebiete aus. Ihre Gene lassen sich von Skandinavien bis Sibirien nachweisen. Bislang war unklar, wie es den Menschen in der Bronzezeit gelang, solch enorme Distanzen zurückzulegen. Nach einer Studie unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Menschheitsgeschichte könnte der beginnende Konsum von Milchprodukten ein bedeutender Faktor bei der Migration gewesen sein. Denn Milch enthält Wasser und wichtige Nährstoffe, die in Steppen anderweitig oft nicht verfügbar sind. Um den Wandel der Ernährung nachzuweisen, nutzten die Forschenden Zahnstein von den Zähnen erhaltener Skelette. Vor der Bronzezeit fanden sich so gut wie keine Anhaltspunkte für Milchkonsum, während in der frühen Bronzezeit nahezu alle Untersuchten Milchtrinker waren. Der Übergang zur Milchwirtschaft fand damit genau zu dem Zeitpunkt statt, als die Hirtenvölker sich nach Osten auszubreiten begannen. Sehr wahrscheinlich spielten dabei auch domestizierte Pferde eine Rolle: Die Hirten aßen das Fleisch, sie tranken die Milch und nutzten die Tiere auch als Transportmittel.

www.mpg.de/17544602

Zwischen dem vom Hochwasser verwüsteten Kreis Ahrweiler und den Vulkaneen in der Eifel liegen weniger als hundert Kilometer. Genau diese Maare liefern nun einen weiteren Hinweis, dass Wetterextreme wie Starkregen künftig zunehmen könnten. Forschende der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz und des Max-Planck-Instituts für Chemie haben an den Schichten von Sedimentbohrkernen aus Maarseen und Trockenmaaren der Vulkaneifel präzise abgelesen, wie sich das Klima in Mitteleuropa während der letzten 60 000

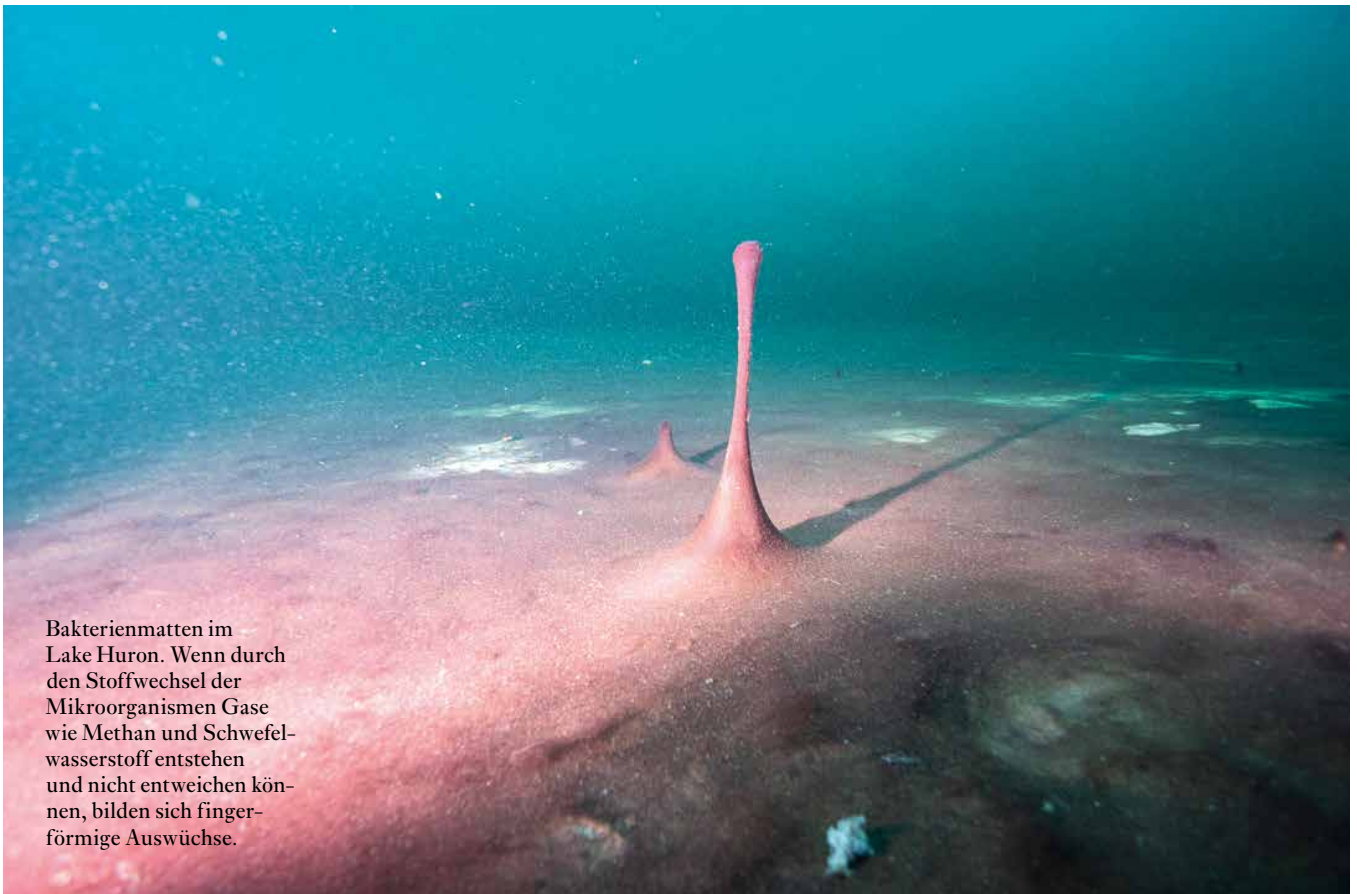
Jahre veränderte: In Kaltzeiten sind die Schichten sehr dünn und kaum sichtbar. In Warmzeiten ist in den Schichten dagegen ähnlich wie bei den Jahresringen eines Baumes der Gang der Jahreszeiten zu erkennen. Zudem bildeten sich in diesen Phasen teilweise besonders dicke Sedimentschichten, die mehrere Millimeter bis wenige Zentimeter umfassen können – das weist auf Hochwasserereignisse hin. Das Klima schwankte in diesen Phasen also offenbar mehr, Wetterextreme waren stärker.

www.mpg.de/17376189

Pferde in der eurasischen Steppe: Vor 5000 Jahren nutzten Hirten sie als Milchquelle und als Transportmöglichkeit, um in weit entfernte Gebiete zu migrieren.



FOTO: A. SENOKOSOV



Bakterienmatten im Lake Huron. Wenn durch den Stoffwechsel der Mikroorganismen Gase wie Methan und Schwefelwasserstoff entstehen und nicht entweichen können, bilden sich fingerförmige Auswüchse.

11

EIN LANGER TAG FÜR MIKROBEN

Fast der gesamte Sauerstoff auf der Erde stammt aus der Fotosynthese – ein biochemischer Prozess, der nur mit Licht abläuft. Als Cyanobakterien die Fotosynthese vor mehr als 2,4 Milliarden Jahren erfunden haben, waren die Tage jedoch um mehrere Stunden kürzer als heute. Erst als sich die Erde aufgrund der Anziehungskraft des damals noch jungen, ihr näher stehenden Mondes und der bremsenden Wirkung der Gezeiten langsamer drehte, wurden die Tage länger. Forschenden des Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie

zufolge waren die länger werdenden Tage ein Grund, warum der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre anstieg. Die Forschenden untersuchten Cyanobakterien im Lake Huron in Michigan, die unter ähnlichen Bedingungen wie auf der frühen Erde leben. Im sauerstoffarmen Wasser des Sees konkurrieren sie mit schwefeloxidierenden Bakterien. Tag für Tag führen die Mikroorganismen einen kleinen Tanz auf: Während nachts die schwefelfressenden Bakterien über den Cyanobakterien liegen, wandern Letztere bei Sonnenaufgang an die

Oberfläche der Matte und produzieren durch die Fotosynthese Sauerstoff. Allerdings dauert es ein paar Stunden, bis sie richtig loslegen. Zudem bildet sich zwischen den Bakterienmatten und der Wasseroberfläche bei kürzeren Tagen ein schwächeres Gefälle der Sauerstoffkonzentration aus; das Gas diffundiert daher langsamer aus dem Wasser. Die länger werdenden Tage in der Erdgeschichte könnten also die heutige Sauerstoffkonzentration und damit das Leben, wie wir es kennen, erst möglich gemacht haben. www.mpg.de/17312182

KERNFUSION ERREICHT EIN ZWISCHENZIEL

Mit der Kernfusion könnte sich eine praktisch unerschöpfliche Energiequelle auftun. Um sie anzuzapfen, konkurrieren weltweit verschiedene Ansätze, die jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Auf einem dieser Wege hat ein Team des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik in Greifswald mit der Fusionsanlage Wendelstein 7-X nun ein Zwischenziel erreicht. In der Anlage vom

Typ Stellarator haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler den Magnetkäfig, in dem das Fusionsplasma eingeschlossen werden soll, so optimiert, dass Energieverluste im Vergleich zu früheren Anlagen desselben Typs deutlich minimiert werden. Damit erfüllt dieser Bautyp eine Voraussetzung, um künftig einmal als Kraftwerk realisiert zu werden.

www.mpg.de/17350399

BILD: MPI FÜR PLASMAPHYSIK

GEDÄCHTNIS FÜR CORONA

Manche Menschen besitzen Gedächtnis-Immunkzellen, die das neue Coronavirus Sars-CoV-2 erkennen, obwohl sie noch nie mit dem Erreger Kontakt hatten. Diese sogenannten T-Helferzellen mussten sich offenbar in der Vergangenheit mit harmloseren Erkältungsviren auseinandersetzen. Ein Team der Berliner Charité und des Max-Planck-Instituts für molekulare Genetik hat das Immunsystem von fast 800 Menschen analysiert, die zuvor noch nicht mit Sars-CoV-2 in Kontakt gekommen waren. Es zeigte sich, dass der Körper T-Helferzellen, die er gegen Erkältungsviren gebildet hat, auch gegen Sars-CoV-2 mobilisiert und so eine Kreuzimmunität ausbildet. Bei Erkältungen mit harmloseren Coronaviren baut das Immunsystem also eine Art universelles Gedächtnis für Coronaviren auf. Das schützt zwar nicht mit Sicherheit vor Sars-CoV-2, eine frühere Erkältung durch Coronaviren könnte aber den Verlauf der Erkrankung günstig beeinflussen. Zudem kann sie die Wirkung einer Impfung beschleunigen: Während normale T-Helferzellen über einen Zeitraum von zwei Wochen schrittweise aktiviert werden, sprechen die kreuzreagierenden T-Helferzellen schon innerhalb von einer Woche auf die Impfung mit dem Vakzin von Biontech an. Die Forschenden stellten jedoch auch fest, dass die Kreuzimmunität im höheren Lebensalter sinkt.

www.mpg.de/17406765



FOTO: PICTURE ALLIANCE / GES / HELGE PRANG

Historischer Treffer: Im Viertelfinale der EM 2016 erzielte Jonas Hector beim Elfmeterschießen das entscheidende Tor gegen Italien. Zuvor war der Münzwurf zugunsten der deutschen Mannschaft ausgefallen.

MÜNZE BEEINFLUSST ELFMETERSCHIESSEN

Das Viertelfinale der Fußball-Europameisterschaft 2016 wird manchen Fans noch in Erinnerung sein. Nach der Verlängerung musste die deutsche Mannschaft ins Elfmeterschießen gegen Italien. Wie üblich wurde per Münzwurf ausgelost, welcher Kapitän über den ersten Schuss entscheiden darf. Bastian Schweinsteiger gewann die Auslosung für das deutsche Team und entschied, der italienischen Mannschaft den Vortritt zu lassen – zum Unverständnis vieler Kommentatoren. Nicht nur bei ihnen hält sich hartnäckig die These, dass die Möglichkeit, als Erster zu schießen, einen Vorteil bringt. Wissenschaftlich ist diese Annahme nicht haltbar. Untersuchungen haben ge-

zeigt, dass die Gewinnhäufigkeit der zuerst schießenden Mannschaften nur bei etwa 51 Prozent liegt. Einen Unterschied macht hingegen das Ergebnis des Münzwurfs vor dem Elfmeterschießen, wie eine Studie von Matthias Sutter, Direktor am Max-Planck-Institut zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern in Bonn, und drei Düsseldorfer Kollegen ergab: Etwa 60 Prozent der Mannschaften, deren Kapitäne die Auslosung gewinnen, können das nachfolgende Elfmeterschießen für sich entscheiden. So war es auch im EM-Viertelfinale 2016, in dem die deutsche Mannschaft letztlich mit sechs zu fünf siegte.

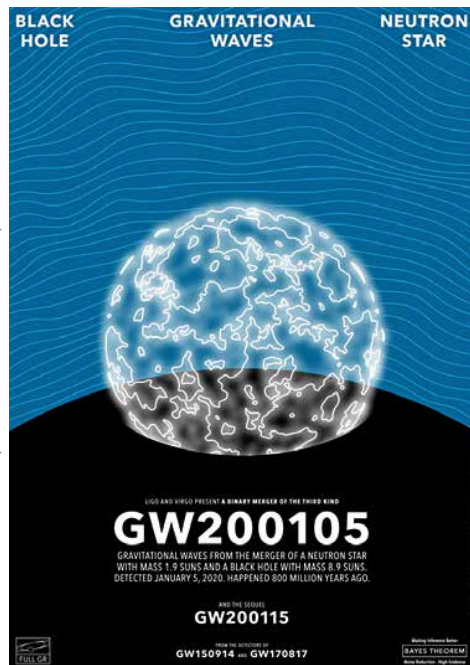
www.mpg.de/17101258

PAUSEN NICHT VERGESSEN

Schnell Gelerntes ist oft auch wieder schnell vergessen. Dies gilt auch für Mäuse: In einem Experiment am Max-Planck-Institut für Neurobiologie sollten sich die Nager die Position eines in einem Labyrinth versteckten Stücks Schokolade merken. Zwischen den Lernphasen im Labyrinth mussten die Mäuse unterschiedlich lange Pausen einlegen. Mit längeren Unterbrechungen prägten sich die Tiere die Position der Schokolade zwar nicht so schnell ein, dafür aber dauerhafter. Während des Tests maßen die Forschenden die Nervenzellaktivität im präfrontalen Kortex – einer Gehirnregion, die an komplexen Denkaufgaben beteiligt ist. Bei kurzen Pausen schwankte das Aktivierungsmuster in diesem Bereich des Gehirns stärker als bei langen Pausen. Offenbar werden dann unterschiedliche Nervenzellen für die Aufgabe aktiviert. Nach längeren Unterbrechungen nutzten die Tiere dagegen dieselben Nervenzellen wie in der ersten Lernphase. Das Erinnerungsvermögen profitiert also möglicherweise davon, dass einmal gebildete Verknüpfungen zwischen den Zellen bei langen Pausen gestärkt werden

www.mpg.de/1729970

BILD: A. S. CARVALHO, BUONANNO, D. MIHAYLOV, J. STEINHOFF (MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK)



Kollisionen im All: Im Stil eines Filmplakats hat ein Künstler dargestellt, wie ein schwarzes Loch einen Neutronenstern verschluckt. Das Bild zeigt die Gravitationswellen-Ereignisse GW200105 und GW200115 – die ersten sicheren Nachweise von Verschmelzungen schwarzer Löcher mit Neutronensternen.

KOSMISCHES FESTMAHL

In einer Entfernung von mehr als 900 Millionen Lichtjahren haben sich kurz hintereinander zwei kosmische Katastrophen ereignet: Zwei schwarze Löcher verschlangen – unabhängig voneinander – innerhalb von zehn Tagen jeweils einen Neutronenstern. Die dabei ausgesandten Gravitationswellen gingen den beiden Detektoranlagen LIGO und Virgo ins Netz. Die Signale gelten als erster sicherer Nachweis der Verschmelzung eines schwarzen Lochs mit einem Neutronenstern. Dabei verschluckten die schwarzen Löcher ihre Nahrung am Stück. Die Ereignisse erlauben erste Rückschlüsse auf die Entstehung dieser seltenen Doppelsysteme und darauf, wie oft sie fusionieren. „Die Gravitationswellen stammen von schwarzen Löchern mit neun und sechs Sonnenmassen, die mit zwei leichteren Objekten von 1,9 und 1,5 Sonnenmassen verschmolzen“, sagt Alessandra Buonanno, Direktorin am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik. Ihr Institut war an Entdeckung und Analyse beteiligt. Die beiden Signale tragen die Bezeichnungen GW200105 und GW200115 und wurden am 5. und am 15. Januar 2020 beobachtet. www.mpg.de/16793202

13

GEGEN DEN KLIMAEFFEKT VON KONDENSSTREIFEN

Durch Kondensstreifen trägt die Luftfahrt mehr zur Erderwärmung bei als durch ihren CO₂-Ausstoß. Denn die darin entstehenden Eiskristalle können in Höhen von etwa acht bis zwölf Kilometern Zirruswolken bilden, die wie CO₂ einen Treibhauseffekt bewirken. Dieser Klimaeffekt lässt sich durch nachhaltige Kraftstoffe reduzieren. Diese werden entweder aus Pflanzen oder aus CO₂ und Wasserstoff gewonnen und weisen nicht nur eine deutlich bessere

CO₂-Bilanz auf, sondern verursachen auch weniger Rußpartikel, an denen Eis kristallisiert. Bei einem Flugzeug, das mit einer Eins-zu-eins-Mischung aus herkömmlichem Kerosin und nachhaltigem Kraftstoff unterwegs ist, bilden sich deshalb in den Kondensstreifen nur halb so viele Eiskristalle wie bei einem mit rein fossilem Kerosin betriebenen Flieger. Das hat ein internationales Team herausgefunden, an dem neben dem Deutschen Zentrum für Luft- und

Raumfahrt und der Nasa auch Forschende des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz beteiligt waren. Infolge der kleineren Zahl an Eiskristallen, die dafür etwas größer sind, reduziert sich der wärmende Effekt von Kondensstreifen um 20 bis 30 Prozent. Die Ergebnisse belegen, dass nachhaltige Kraftstoffe den Beitrag des Luftverkehrs zum Klimawandel kurzfristig spürbar verringern können. www.mpg.de/17075626

LEBEN AUF DER VENUS? KEINE SPUR!

Die Venus ist kein angenehmer Ort zum Leben: Auf der Oberfläche herrschen hoher Druck und Temperaturen um die 460 Grad Celsius; in der dichten Wolkendecke toben heftige Stürme und schweben große Mengen ätzender Schwefelsäure. Könnten sich dennoch Bakterien diesen extremen Bedingungen angepasst und dort überdauert haben? Das behaupten Forschende der Cardiff University in Wales. In Daten, die sie vor einem Jahr mit irdischen Teleskopen von der Venushülle empfangen, wollen sie winzige Mengen des Spurengases Phosphin entdeckt haben. Seitdem diskutieren die Fachleute über den Fund, denn die britische Gruppe hält Bakterien als Phos-

phin-Quelle für wahrscheinlich. Nun hat ein internationales Team, zu dem auch Paul Hartogh vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung zählt, die Originaldaten noch einmal geprüft – und keinerlei Hinweise auf Phosphin gefunden. Vielmehr ergab die Analyse, dass das seltene Gas mit Schwefeldioxid verwechselt worden sein könnte, welches in der Venusatmosphäre reichlich vorkommt. Denn unter den dortigen Bedingungen liegen die Wellenlängen mancher Molekülsorten sehr eng beieinander, was die Identifizierung ihrer Fingerabdrücke im Spektrum massiv erschwert.

www.mpg.de/17208522



FOTO: NASA/JPL-CALTECH

Kein Hort des Lebens: Eine dichte Wolkendecke umhüllt die Venus in einer Höhe von etwa 50 bis 70 Kilometern. Phosphin gibt es in der Atmosphäre wohl nicht.

14



FOTO: XBlickwinkel/AGAMI/R.MARTIN

Schopfwespenbussarde fliegen während des Herbstzuges über 700 Kilometer von Japan nach Südostasien. Diesen rund 18 Stunden dauernden Flug über das Ostchinesische Meer unternehmen die Vögel nur bei optimalen Wind- und Wetterbedingungen. Sie nutzen Aufwinde über dem Meer und können so bis zu tausend Meter über der Meeresoberfläche segeln.

WIND VON ACHTERN

Der Flug über offenes Meer kann für Landvögel gefährlich sein, denn anders als etwa Möwen oder Albatrosse, die an ein Leben im Ozean angepasst sind, können sie nicht auf dem Wasser landen. Sie müssen Meere deshalb ohne Zwischenlandungen überfliegen. Nur mithilfe von Muskelkraft sind lange Strecken jedoch ohne Erholungspausen besonders für große Arten nicht zu bewältigen. Forschende des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie haben nun verschiedene Bussard-, Falken- und Adlerarten auf mehr als hundert Langstreckenflügen über dem offenen Meer mit GPS-Technik verfolgt und die Flug-

routen mit globalen Atmosphären- daten verknüpft. Die Ergebnisse zeigen, dass die Greifvögel über dem Wasser aufsteigende Luftmassen nutzen. Mithilfe der Thermik sparen sie Energie und können so lange Strecken nonstop zurücklegen. Zuvor hatten Forschende schon herausgefunden, dass Vögel auf ihrem Zug die Windrichtung berücksichtigen und sich von Rückenwind über Meere tragen lassen. Zugvögel überfliegen größere Meeresgebiete also nur bei geeigneten Rücken- und Aufwindbedingungen. Auf diese Weise können sie Hunderte Kilometer über offener See zurücklegen.

www.mpg.de/17439730

IM TON VERSCHÄTZT

Wie gut treffen professionelle Sängerinnen den richtigen Ton? Und wie beurteilen sie ihre Leistungen? Diesen Fragen ist ein Forschungsteam des Frankfurter Max-Planck-Instituts für empirische Ästhetik, der New York University und der Universität Hamburg nachgegangen. Professionelle Sopranistinnen sangen einzeln im Studio *Happy Birthday* ein. Anschließend bewerteten sie die Aufnahmen ihrer eigenen Gesangsdarbietungen sowie die ihrer Kolleginnen. Als objektives Maß für musikalische Qualität diente die

Tonhöhengenaugigkeit – also die Fähigkeit, die Töne richtig zu treffen. Die meisten Teilnehmerinnen lagen in ihrer Selbsteinschätzung erstaunlich falsch und bewerteten die eigenen Leistungen zu hoch. Auffälligerweise schätzten allerdings gerade die besonders guten Sängerinnen ihren eigenen Gesang realistisch ein. Das deutet darauf hin, dass die Fähigkeit zur Selbsteinschätzung eine Voraussetzung ist, um herausragende musikalische Fähigkeiten zu entwickeln.

www.mpg.de/17073065

ILLUSTRATION: ISTOCKPHOTO/DUNCAN 1890



Stimmt der Ton? Eine Studie ergab, dass mittelmäßige Profisängerinnen ihre eigenen Leistungen oftmals überschätzen.

SPAZIERGANG FÜRS GEHIRN

Erwachsene verbringen durchschnittlich 80 bis 90 Prozent des Tages in geschlossenen Räumen – eine recht junge Entwicklung in der menschlichen Evolution. Besonders gesund ist dieses Verhalten vermutlich nicht. Zeit im Freien zu verbringen, wirkt sich nachweislich positiv auf die Gesundheit aus. Und auch unsere Gehirnstruktur profitiert von Aufenthalt draußen, wie eine Untersuchung des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung und des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf nun ergab. Das gilt auch bereits bei recht kurzen Phasen im Freien – und unabhängig davon, ob wir in der Stadt oder im Grünen sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zeit, die die Teilnehmenden im Freien verbrachten, in einem positiven Zusammenhang mit der grauen Substanz in einem bestimmten Teil der Großhirnrinde steht. Dieser Teil des Kortex ist an der Planung und Regulation von Handlungen und an der Steuerung des Verhaltens beteiligt. Zudem ist bekannt, dass viele psychiatrische Störungen mit einer Reduktion der grauen Substanz in diesem Bereich des Gehirns einhergehen.

www.mpg.de/17194664

VORSORGE GEHT VOR

Bäume haushalten mit ihren Reserven anders als bislang angenommen. Sie bilden nämlich auch in Hungerphasen, also etwa während langer Trockenperioden, energiereiche Kohlenstoffverbindungen, die ihnen für noch schlechtere Zeiten als Vorräte dienen. Dafür verzichten sie darauf weiterzuwachsen und verdauen im Extremfall sogar eigene energiereiche Bestandteile. Auf diese Weise verhindern Bäume, dass sie ihre Reserven aufbrauchen und ihnen schlimmstensfalls der Tod durch

Verhungern droht oder sie die Energie für die Abwehr von Schädlingen nicht mehr aufbringen können. Bislang ging die biologische Forschung davon aus, dass Pflanzen nur Reserven bilden, wenn genügend Fotosyntheseprodukte vorhanden sind und auch der Bedarf für ihr Wachstum gedeckt ist. Anhand der neuen Erkenntnisse lassen sich Modelle verbessern, die vorhersagen, wie sich Wälder mit dem fortschreitenden Klimawandel entwickeln werden.

www.mpg.de/17341650

FOTO: MARTIN SIEPMANN/IMAGEBROKER/FOTOFINDER.COM



Mit Durst droht der Hungertod: In Trockenzeiten können Bäume wie diese Fichten in Oberbayern nicht genügend Kohlehydrate bilden. Dann müssen sie auf Reserven zurückgreifen, die sie vorher angelegt haben.

DER WALDBAU BRAUCHT FRISCHE WURZELN

Den Wäldern in Deutschland und anderen Teilen Europas setzt der Klimawandel sehr heftig zu. Bislang nicht hinterfragte Überzeugungen, welche Bäume Hitze und Trockenheit widerstehen, gelten nicht mehr. Daher plädiert der Ökophysiologe Henrik Hartmann dafür, ein interdisziplinäres Institut für Waldumbau zu schaffen. Es soll wissenschaftliche Erkenntnisse liefern, wie der Wald gestaltet werden kann, um die fortschreitende Erderwärmung auszuhalten.

Der Wald sieht schlecht aus. Um seine Veränderung zu dokumentieren, haben wir in den vergangenen Jahren Wälder in der Umgebung Jenas immer wieder mit einer Drohne überflogen. Die Aufnahmen zeigen Erschreckendes. Viele der Wälder sind gespickt mit absterbenden und toten Bäumen, die Kronen vieler Bäume sind licht, dürre Äste ragen heraus, wo vor wenigen Jahren noch sattes Grün zu sehen war. Auch die Farbe der Baumkronen gibt Grund zur Sorge, schon im August sehen viele Bäume so aus, wie man es sonst erst Ende September erwartet, wenn das Grün der Blätter langsam in Gelb übergeht. Diese Beobachtungen sind beispielhaft für eine generelle Entwicklung: Der Klimawandel bedroht die Nachhaltigkeit der mitteleuropäischen und auch der deutschen Land- und Forstwirtschaft. Schon jetzt sind viele Ökosysteme in ihrer derzeitigen Form bedroht, und die Aussichten für die kommenden Jahrzehnte sind auch eher düster. Die Extremsommer 2018 und 2019 haben vor allem im Wald verheerende Schäden hinterlassen, mehrere Hunderttausend Hektar wurden zerstört, oftmals Fichtenmonokulturen, die dem Borkenkäfer zum Opfer fielen. Aber nicht nur die Fichte war betroffen. Auch andere Baumarten haben stark gelitten, darunter viele Laubbäume und die Kiefer, die bislang als vergleichsweise resistent gegen Trockenheit gegolten hatten. Die Absterberaten der verschiedenen Baumarten sind

→

ZUR SACHE

HENRIK HARTMANN



ILLUSTRATION: SOPHIE KETTERER FÜR MPG

17

Henrik Hartmann studierte Forstwissenschaft und Biologie an den kanadischen Universitäten von Neu-Braunschweig und Quebec, wo er auch promovierte. Seit 2014 leitet er am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena eine Forschungsgruppe. Diese untersucht beispielsweise, wie Bäume auf Stress durch Trockenheit reagieren und wie sie generell mit knappen Ressourcen umgehen. Ferner wird untersucht, wie Bäume die Speicherung von Nährstoffen, vor allem Kohlenstoff und Stickstoff, steuern. Der Zustand der hiesigen Wälder macht Hartmann große Sorgen. Daher will er Fachleute aus der Forstwissenschaft und der Forstwirtschaft, aus der Biologie, aber auch aus den Sozialwissenschaften zusammenbringen, um den Wald gegen den Klimawandel zu wappnen.

FORSTWIRT- UND FORST- WISSENSCHAFT KÖNNEN NICHT MEHR VORGEHEN WIE SEIT JAHR- HUNDERTEN

seit 2017 exponentiell um ein Vielfaches gestiegen. Spätestens seit dem Sommer 2018 ist die Frage der Resilienz des deutschen Waldes gegenüber dem Klimawandel auch in der öffentlichen Debatte angekommen. Das Thema Wald(-sterben) wird fast täglich in Zeitungen, im Radio und im Fernsehen aufgegriffen und in der Öffentlichkeit oft kontrovers diskutiert.

Lange bevor die Öffentlichkeit sich für den Wald zu interessieren begann, haben sich Forstwissenschaftler mit der Frage befasst, ob beziehungsweise wie gut einige der bei uns heimischen Baumarten für die künftigen Klimaverhältnisse geeignet sind. So hat zum Beispiel eine Gruppe um Heinz Renneberg von der Universität Freiburg bereits 2004 untersucht, ob

sich die Buche für den zukünftigen Waldbau unter verschärftem Klimawandel eignet. Die Studie bescheinigte der „Trockenstress- und Überflutungs-sensitiven Baumart“ ein bereits deutlich „reduziertes Wachstum und reduzierte Konkurrenzkraft“, eine Entwicklung „die sich in den kommenden Jahrzehnten fortsetzen und wahrscheinlich verstärken wird“. Zu diesem Artikel gab es eine ganze Reihe von wissenschaftlichen Stellungnahmen, die sogar bis ins Jahr 2016 darauf beharrten, dass die Buche in den Wäldern Deutschlands auch bei fortschreitendem Klimawandel eine vorherrschende Baumart bleiben könne. Und das, obwohl sich inzwischen herausgestellt hatte, dass es sich um einen Folgeschaden handelt, wenn die Buche bei Trockenheit ihre Blätter abwirft – und keineswegs um einen Schutzmechanismus, um Trockenstress zu vermeiden. Die Buche lässt ihre Blätter also nicht welken, um Blattfläche und somit die Verdunstung zu reduzieren. Die Blätter welken vielmehr, da ihre Wasserversorgung unterbunden ist. Die Ereignisse von 2018 und 2019 haben zudem gezeigt, dass die Buche auf Klimawandel nicht nur mit dem von Heinz Renneberg und seinen Mitautorinnen und -autoren prognostizierten reduzierten Wachstum und mit reduzierter Konkurrenzkraft reagiert, sondern dass sie starke Schäden erleidet. Oft stirbt sie sogar ab, was noch vor wenigen Jahren nur wenige für möglich gehalten hätten. Bei anderen Baumarten sind ähnliche Bedenken ebenso angebracht, vor allem angesichts des fortschreitenden Klimawandels. Ahorne, Eschen, Kiefern und andere Arten sind ebenfalls betroffen, und derzeit kann sicherlich niemand vorhersagen, unter welchen klimatischen Bedingungen bisher robuste Arten wie beispielsweise die Eiche an ihre Belastungsgrenzen kommen.

In Anbetracht des fortschreitenden Klimawandels können die Forstwirtschaft und die Forstwissenschaft nicht mehr so vorgehen, wie sie es seit Jahrhunderten getan haben. Denn sie können nicht mehr auf Erfahrungen der Vergangenheit aufbauend in die Zukunft planen. Wie das Beispiel der

GERADE GROSSE UND ALTE BÄUME LEIDEN UNTER DÜRRE AM MEISTEN

Buche zeigt, sind Erkenntnisse, die unter anderen Rahmenbedingungen gesammelt wurden, nur noch bedingt auf die zu erwartenden klimatischen Entwicklungen anwendbar. Diese Rückspiegelmethode ist demnach auch nicht zielführend in öffentlichen Debatten um die Zukunftsfähigkeit der Forstwirtschaft, die oft von selbst ernannten Experten und Fernsehforstern maßgeblich beeinflusst werden. Die Forderung etwa, mehr auf den oft gepriesenen artenreichen Laubmischwald als resilienten Wald der Zukunft zu setzen, entbehren einer wissenschaftlichen Grundlage, wie die hohen Absterberaten vieler Laubbaumarten zeigen. So geht aus einer gerade erschienenen Analyse der Waldinventurdatensätze der USA und Kanadas unter anderem hervor, dass in Wäldern gemäßigter Klimazonen Mortalitätsraten mit wachsender Artenvielfalt ansteigen, besonders unter klimatisch extremen Bedingungen. Selbstverständlich kann und soll diese Beobachtung kein Argument für einen Ausbau von Monokulturen sein, sie begründet jedoch starke Zweifel an einfachen Lösungsansätzen, die zwar zunächst schlüssig und richtig erscheinen mögen (wer würde schon Vorteile von Vielfalt intuitiv anzweifeln?), aber nur emotional und nicht empirisch begründet sind.

Das gilt auch für die von Greenpeace e. V. in Auftrag gegebene und 2018 veröffentlichte Studie *Waldvision für Klima, Mensch und Natur*, die sich als Wegweiser für die Waldwirtschaft der kommenden Jahrzehnte versteht. Demnach sollen Bäume erst dann geerntet werden, „wenn sie älter und dicker sind“, und es soll „seltener und weniger stark in den Wald eingegriffen“ werden, um den Vorrat an dicken Bäumen im Vergleich zur herkömmlichen Bewirtschaftung fast zu verdreifachen. Das in dieser Studie vermittelte, geradezu idyllische Bild von „bunt gemischt nebeneinanderstehenden großen und kleinen, dicken und dünnen Bäumen“ ist zwar emotional ansprechend, kann aber eine wissenschaftliche Grundlage für die in der Studie suggerierte Nachhaltigkeit älterer Wälder nicht ersetzen. Denn inzwischen ist das Gegenteil erwiesen: Gerade große und alte Bäume leiden unter Dürre am meisten, und es ist sogar damit zu rechnen, dass Wälder unter zukünftigen klimatischen Bedingungen generell jünger und kleiner werden, da große und alte Bäume stärker den Belastungen und Störungen ausgesetzt sind, die mit dem Klimawandel einhergehen, und vermehrt absterben.

In die Debatte über die Zukunft des Waldes müssen natürlich vielfältige Meinungen und Auffassungen einfließen. Emotional anregende, aber irreführende und wissenschaftlich fragwürdige Berichte sollten hingegen die Diskussionen nicht bestimmen dürfen. Leider haben aber gerade solche Beiträge oft einen bedeutenden Einfluss auf die öffentliche Wahrnehmung.



FÜR DIE ZUSAMMENFÜHRUNG VON DATEN IN EINER OFFENEN INFRASTRUKTUR FEHLT DER LEGALE RAHMEN

Eine zukunftsorientierte Strategie für den Wald muss auf wissenschaftliche Erkenntnisse und Fakten bauen, nicht auf Überzeugungen und Wunschvorstellungen. Grundlage für Erkenntnisse kann nur eine systematische Erfassung des Waldgeschehens liefern, die dann auch bisherige standort- und vegetationskundliche Positionen korrigieren und ergänzen kann. So liefern zum Beispiel Absterberaten gerade dann wichtige Informationen, wenn man daraus erkennen kann, welche Baumart auf welchen Standorten ganz besonders betroffen ist. In dieser Hinsicht fehlt aber noch ein gleichermaßen umfassender wie detaillierter Überblick darüber, wie die klimatische Entwicklung die Absterberaten an verschiedenen Standorten beeinflusst. Zwar gibt es zahlreiche Erhebungen des Waldzustands: von der Bundeswaldinventur über Erfassungen der Länder bis hin zur Erfassung im Rahmen des International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (kurz: ICP Forests). Doch keine dieser Erhebungen bietet die räumliche und zeitliche Auflösung, die notwendig ist, um zwischen Entwicklungen an einzelnen Standorten und klimatischen Ereignissen Kausalzusammenhänge zu ermitteln. Außerdem sind die Daten der Erhebungen meist in nicht offen zugänglichen Archiven hinterlegt, was eine dezentrale Auswertung durch die wissenschaftliche Gemeinschaft erschwert.

In den letzten Jahren wird das Waldgeschehen vermehrt auch mittels fernerkundlicher Zeitreihen (etwa über Satellitendaten) erfasst. Hierbei ist die zeitliche Auflösung sehr hoch (einige Tage bis Wochen), die räumliche Auflösung erlaubt allerdings meist keine Auswertung der Waldschäden auf der Ebene einzelner Bäume. Es entsteht also zwischen nah- und fernerkundlicher Erfassung eine Lücke bei der zeitlichen und räumlichen Auflösung. So lässt sich nicht auf klimabedingte Bestandsschäden auf regionaler Ebene schließen, was wiederum den Ausbau standortbezogener vegetationskundlicher Erkenntnisse erschwert. Diese Lücke kann durch eine systematische Zusammenführung der verschiedenen Datensätze geschlossen werden, wobei die im Wald gesammelten Informationen zur besseren Auswertung der Fernerkundungsdaten dienen und nahezu zu einem Echtzeitmonitoring des Waldgeschehens beitragen. Derzeit fehlt jedoch für die systematische Zusammenführung der Daten in einer offen zugänglichen Infrastruktur der notwendige legale Rahmen, der die Bereitstellung der Daten durch die verantwortlichen Institutionen ermöglicht oder gar einfordert. Daher muss der Gesetzgeber die Idee, Daten zu teilen, gezielt fördern und ihre Umsetzung auch einfordern. Zudem muss Kompetenzgerangel unter Institutionen unterbunden werden, das dem Teilen von Daten oft im Wege steht.

EIN INTER- DISZIPLINÄRES INSTITUT FÜR DIE PLANUNG ZUM WALD DER ZUKUNFT

Ferner sollten Synergien zwischen den verschiedenen Institutionen des Bundes und der Länder sowie der an der Auswertung der Daten interessierten akademischen Experten (Lehrstühle, Forschungsinstitute, wissenschaftliche Netzwerke etc.) durch forstpolitische Koordination gefördert und die Zusammenarbeit der für den Waldumbau wichtigen Disziplinen gestärkt werden. Die in Deutschland vorhandenen Kompetenzen in diesen

Disziplinen (etwa Vegetationsmodellierung, Waldökologie oder Ökophysiologie, aber auch Ökonomie und Sozialwissenschaften) sind enorm, die Zersplitterung aber auch. Diese Kompetenzen in einem (virtuellen) Institut für Waldumbau zusammenzuführen, würde der Zersplitterung entgegenwirken und viele Synergien ermöglichen. Neben der zeitnahen Erfassung des Waldgeschehens müssen dabei relevante Forschungsthemen identifiziert und der Modellierung für die forstliche Planung eine viel wichtigere Rolle zugewiesen werden. Bislang verwendete empirische Modelle, die aus vergangenen Entwicklungen der Bestände deren zukünftige Veränderung prognostizieren, sind für Projektionen in die klimatisch unsichere Zukunft wenig geeignet. Und mechanistische Modelle, die grundlegende Prozesse in Bäumen abbilden, brauchen mehr Informationen über die physiologischen

Eigenschaften und Anpassungsfähigkeiten unserer Baumarten. Diese können durch Intensivmonitoring im Wald, aber auch durch Experimente im Wald und im Gewächshaus gewonnen werden.

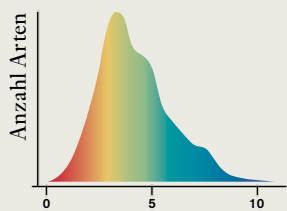
21

Ein derart interdisziplinär aufgestelltes Institut böte beste Voraussetzungen für die Planung der forstwissen- und forstwirtschaftlichen Marschrichtung hin zum Wald der Zukunft. Die Verzahnung von Ressortforschung, forstwirtschaftlicher Expertise, Grundlagenforschung und Forstpolitik kann ein gesamtheitliches Verständnis des Systems Wald als Grundlage für zukunftsorientierten Waldbau liefern. In die forstpolitische Planung sollten auch Interessenverbände einbezogen werden, von Naturschutzinitiativen bis hin zu Jagdverbänden, um die gesellschaftlichen Anforderungen an den Wald, aber auch die Bedürfnisse des Waldes zu definieren. Ein solcher Ansatz für die zukünftige Forstwirtschaft und Forstwissenschaft soll also durch Vielschichtigkeit und Vielfältigkeit geprägt sein – so wie der Wald selbst.



VIELE STIMMEN IM VOGELCHOR

So unterschiedlich die Vögel, so verschieden auch ihr Gesang. In dem hier kreisförmig angeordneten Stammbaum der Sperlingsvögel sind Arten mit tiefen Stimmen rot, solche mit hohen Stimmen blau hervorgehoben. Die Farbverteilung zeigt, dass im Stammbaum benachbarte – also nah verwandte – Vogelarten oft ähnliche Stimmhöhen haben. Wie hoch ein Vogel singt, wird folglich größtenteils von der Stimmhöhe der Vorfahren bestimmt. (Die gezeigten Vögel stehen jeweils stellvertretend für eine von zehn Gruppen innerhalb der Sperlingsvögel.)



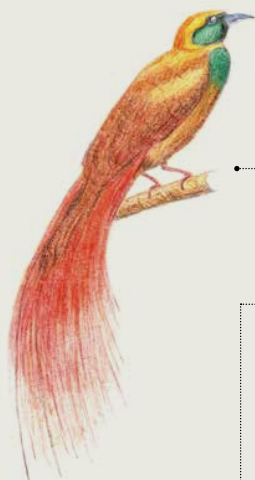
Maximale Tonhöhen von Sperlingsvögeln in Kilohertz (kHz).

(Durchschnitt: ca. 4 kHz)

22



Graurücken-Leierschwanz
Australien
103 cm



Raggi-Paradiesvogel
Papua-Neuguinea
34 cm



Rallenflöter
Südostasien
29 cm



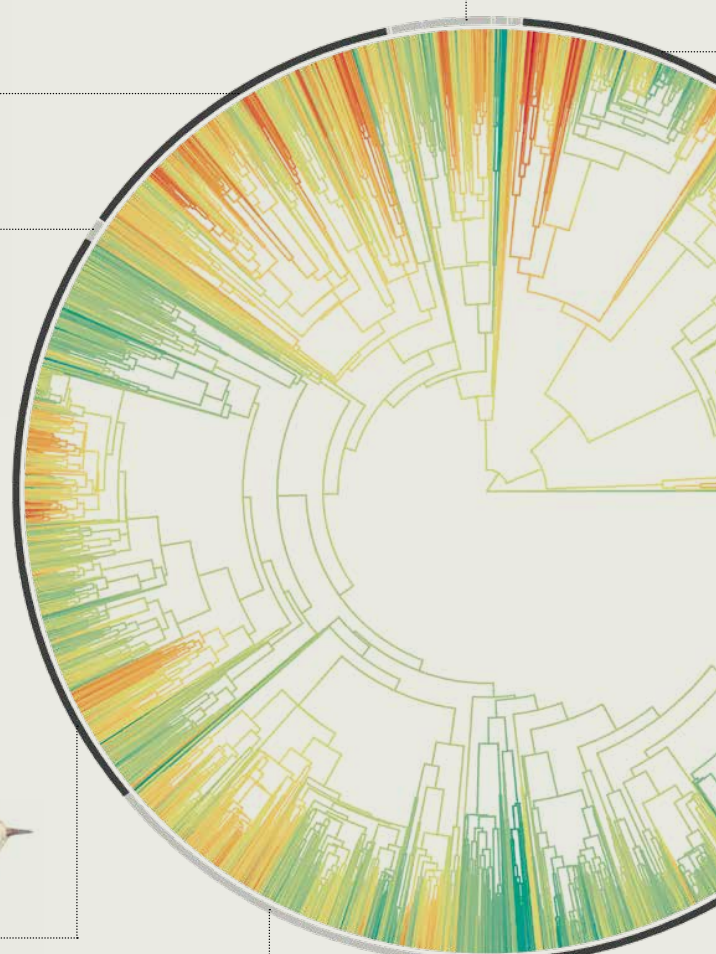
Rotscheitel-Zistensänger
Afrika
14 cm



Wanderdrossel
Nordamerika
25 cm

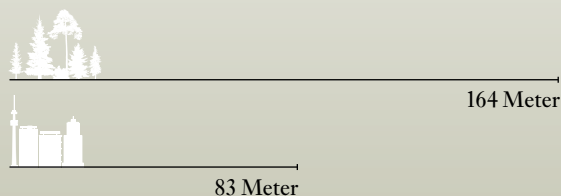


Tigerwaldsänger
Nordamerika
13 cm



UNTERSCHIEDLICHE AKUSTIK

Im Wald hört eine Amsel den Gesang eines Artgenossen in doppelter Entfernung wie in der Stadt mit ihrem hohen Lärmpegel.





Rotrücken-Sensenschnabel
Südamerika
25 cm



Langlappen-Schirmvogel
Südamerika
41 cm



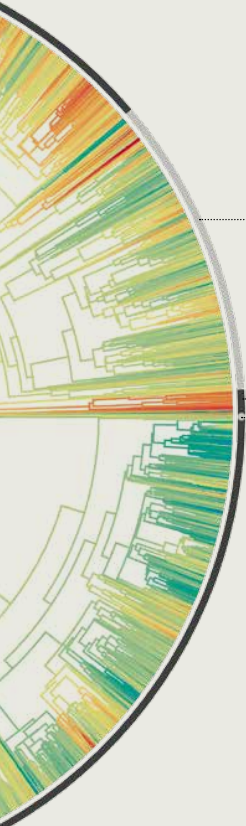
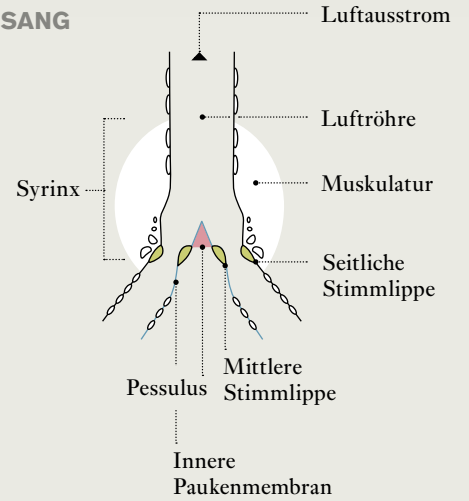
Graukopf-Breittrachen
Afrika
17 cm



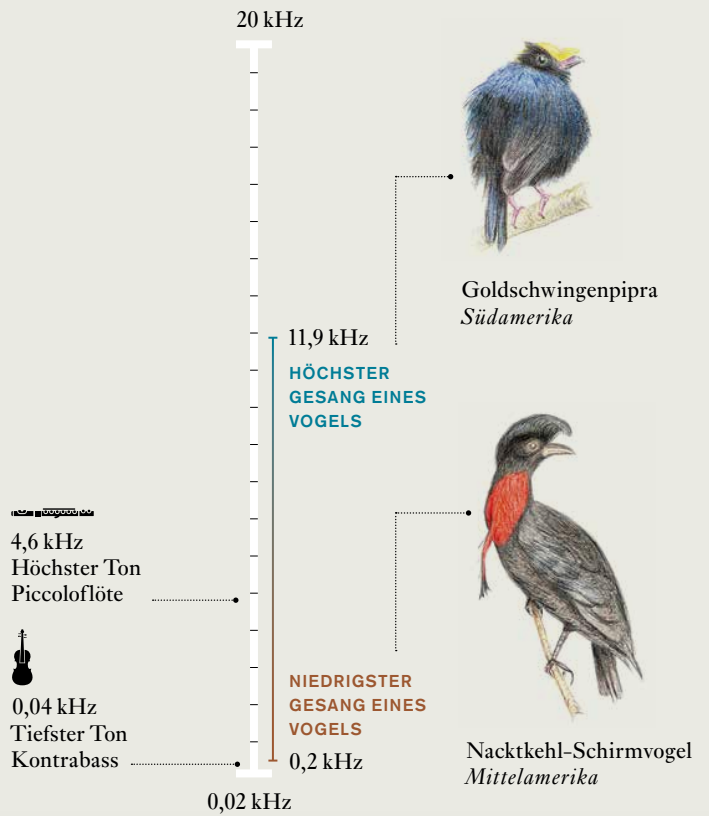
Felsschlüpfer
Neuseeland
10 cm

MEHRSTIMMIGER GESANG

Singvögel singen mit der sogenannten Syrinx, die an der Aufspaltung der Luftröhre liegt. Die Syrinx kann in den beiden Bronchien jeweils eigene Töne produzieren. Die Vögel können deshalb zwei Laute gleichzeitig singen oder sehr schnell von einem zum anderen wechseln.



Hörbereich Mensch



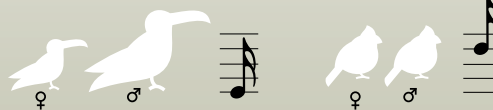
WEITERE EINFLÜSSE

Außer von der evolutionären Geschichte hängt die Gesangshöhe eines Vogels auch maßgeblich von seiner Größe und damit der seiner Syrinx ab. Zudem beeinflusst der Größenunterschied zwischen Männchen und Weibchen die maximale Tonhöhe.

GRÖSSE



SEXUALDEMORPHISMUS



IM FOKUS

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ MACHT SICH SCHLAU

24 | Nicht ohne Grund!

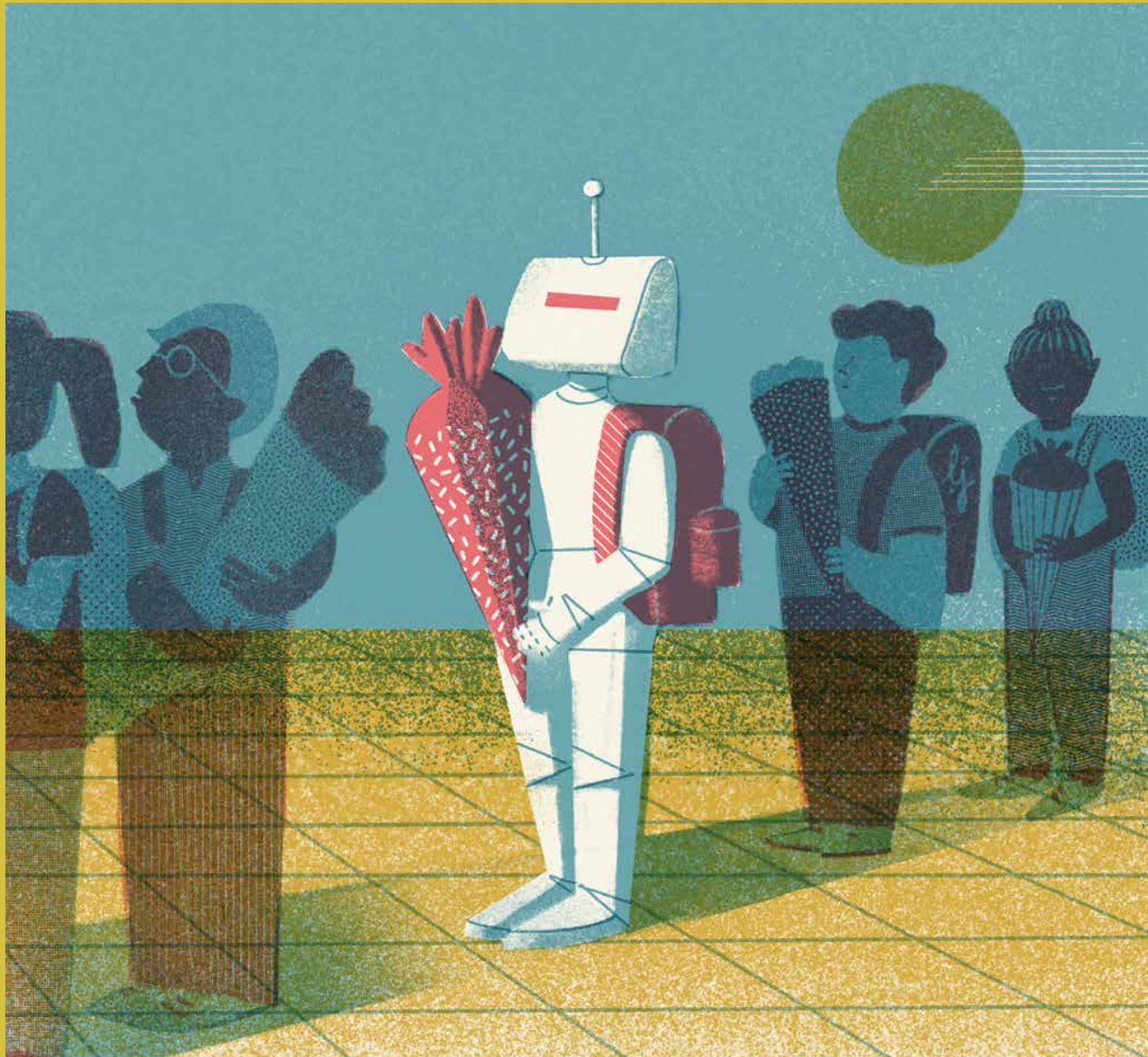
32 | Wenn Maschinen mitmischen

38 | Eine Software scannt die Psyche

24

ILLUSTRATION: LUISA JUNG FÜR MPG

Lernen wie ein Mensch: Systeme mit künstlicher Intelligenz sollen zukünftig nicht mehr nur Muster in großen Datenmengen erkennen, sondern auch nachvollziehbar machen, nach welchen Kriterien sie ihre Entscheidungen treffen.



NICHT OHNE GRUND!

TEXT: THOMAS BRANDSTETTER

25

Künstliche Intelligenz erkennt Muster schon lange viel besser als wir. Um aber ihren Namen wirklich zu verdienen, müsste sie auch kausale Zusammenhänge verstehen. Am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Tübingen arbeiten Forschende genau daran.

Ursache und Wirkung sind überall. Und nicht immer ist das ungleiche Paar so leicht zu erkennen wie beim Dominoeffekt, wo ein Stein den nächsten umstößt. So haben menschliche Entscheidungen oft sehr komplexe Ursachen – und mitunter noch komplexere Auswirkungen. Manchmal beeinflussen sich Dinge auch wechselseitig, etwa wenn unser CO₂-Ausstoß die Erde erwärmt und auftauende Permafrostböden weiteres Treibhausgas freisetzen. Und wer ein idyllisches Landschaftsfoto betrachtet, sieht dabei in der Regel Schatten, die ihre Ursache im Licht der Sonne haben.

Während wir dank unseres Gehirns kausale Zusammenhänge meist intuitiv erkennen, bereiten diese unseren intelligenten Maschinen noch gehörige Schwierigkeiten. Die Maschinen mögen uns zwar im Auffinden von Mustern und Korrelationen übertreffen, das Konzept von Ursache und Wirkung bleibt ihnen aber in aller Regel verborgen. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Abteilung für Empirische Inferenz am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme betrachten diese Unzulänglichkeit als Herausforderung. Unter der Leitung von Bernhard Schölkopf versuchen sie, lernenden Maschinen einen Sinn für Kausalität zu verleihen – und das in so unterschiedlichen Bereichen wie der Suche nach Exoplaneten, dem Klimawandel oder der Vergabe von Krediten.

Experimente bringen Verständnis

Ein Ansatzpunkt ihrer Arbeit ist die Qualität der zur Verfügung stehenden Daten. Die meisten Big-Data-Sätze entstehen aus rein passiver Beobachtung und enthalten keinerlei zusätzliche Informationen darüber, wie sie zustande gekommen sind. So sagen etwa Kontoumsätze, die nur die reinen Geldbeträge und die dazugehörigen Uhrzeiten beinhalten, nichts darüber aus, warum sie getätigt wurden. „Wenn ein System nur passiv Daten sammeln kann, reicht das gewöhnlich nicht aus, um einen kausalen Zusammenhang zu erkennen“, erklärt Julius von Kügelgen, der in der Abteilung für Empirische Inferenz an seiner Dissertation arbeitet. „Leider sind aber 99 Prozent der heute verfügbaren Daten rein passiv gesammelt oder werden zumindest in ihrer Auswertung so behandelt.“ Ein Beispiel dafür sind etwa statistische Daten, aus denen Zusammenhänge wie die Korrelation zwischen dem Schokoladekonsum pro Kopf und der Anzahl der gewonnenen Nobelpreise eines Landes abgeleitet werden können. In diesem Fall gilt das Common Cause Principle, das viele derartige Muster letztlich auf einen kausalen Zusammenhang zurückführt: Entweder be-

einflusst eine Größe die andere, oder es gibt eine zusätzliche, dritte Variable, die beide kausal beeinflusst.

Die Korrelation selbst zu ermitteln, ist für eine Maschine ein Leichtes. Dazu muss der Algorithmus lediglich einschlägige Statistiken durchforsten und etwaige Muster erkennen. Um den Zusammenhang zu verstehen und eine mögliche Erklärung zu finden, braucht es aber zusätzliche Informationen. Uns Menschen hilft dabei in der Regel ein allgemeines Verständnis darüber, wie die Welt funktioniert. Wir haben schon Schokolade gegessen und wissen, dass sie keinen Einfluss auf die Intelligenz hat. Und weshalb sollte ein gewonnener Nobelpreis den Schokoladekonsum ankurbeln? Unsere Überlegungen werden also schnell in Richtung einer dritten Variablen gelenkt, etwa eines starken Wirtschaftssystems, das einerseits zu Wohlstand und Schokolade und andererseits zu einem guten Bildungssystem führt. Da aber einem Computeralgorithmus dieses allgemeine Verständnis fehlt, tappt er angesichts der bloßen Datenlage zwangsläufig im Dunkeln. „Interessanter sind da schon im Experiment gesammelte Daten, wo jemand aktiv in ein System eingreift und etwas verändert“, sagt von Kügelgen. Zum Beispiel zeigt zwar eine genaue Beobachtung schnell eine Korrelation zwischen nassem Boden und Regen auf. Doch ein Experiment, bei dem der Boden mit einem Gartenschlauch und nicht durch Regen nass gemacht wird, enttarnt den vermeintlichen kausalen Zusammenhang.

In seiner aktuellen Forschungsarbeit beschäftigt sich von Kügelgen allerdings mit noch schwierigeren Fällen. Ihn treiben Was-wäre-wenn-Fragen um, konkret etwa: Hätte ich den Kredit vielleicht doch bekommen, wenn mein Einkommen höher gewesen wäre? „Künstliche Intelligenz trifft immer öfter Entscheidungen für Menschen, etwa bei der Einschätzung von Kreditwürdigkeit“, sagt der Forscher. „Unser System kann den Leuten bei der Beantwortung der Frage helfen, was sie machen sollen, um ein positives Ergebnis zu erreichen.“ Dazu konstruiert er gemeinsam mit seinem Kollegen Amir Hossein Karimi Parallelwelten. Dort ist zwar vieles genau so wie in der echten Welt, es gibt

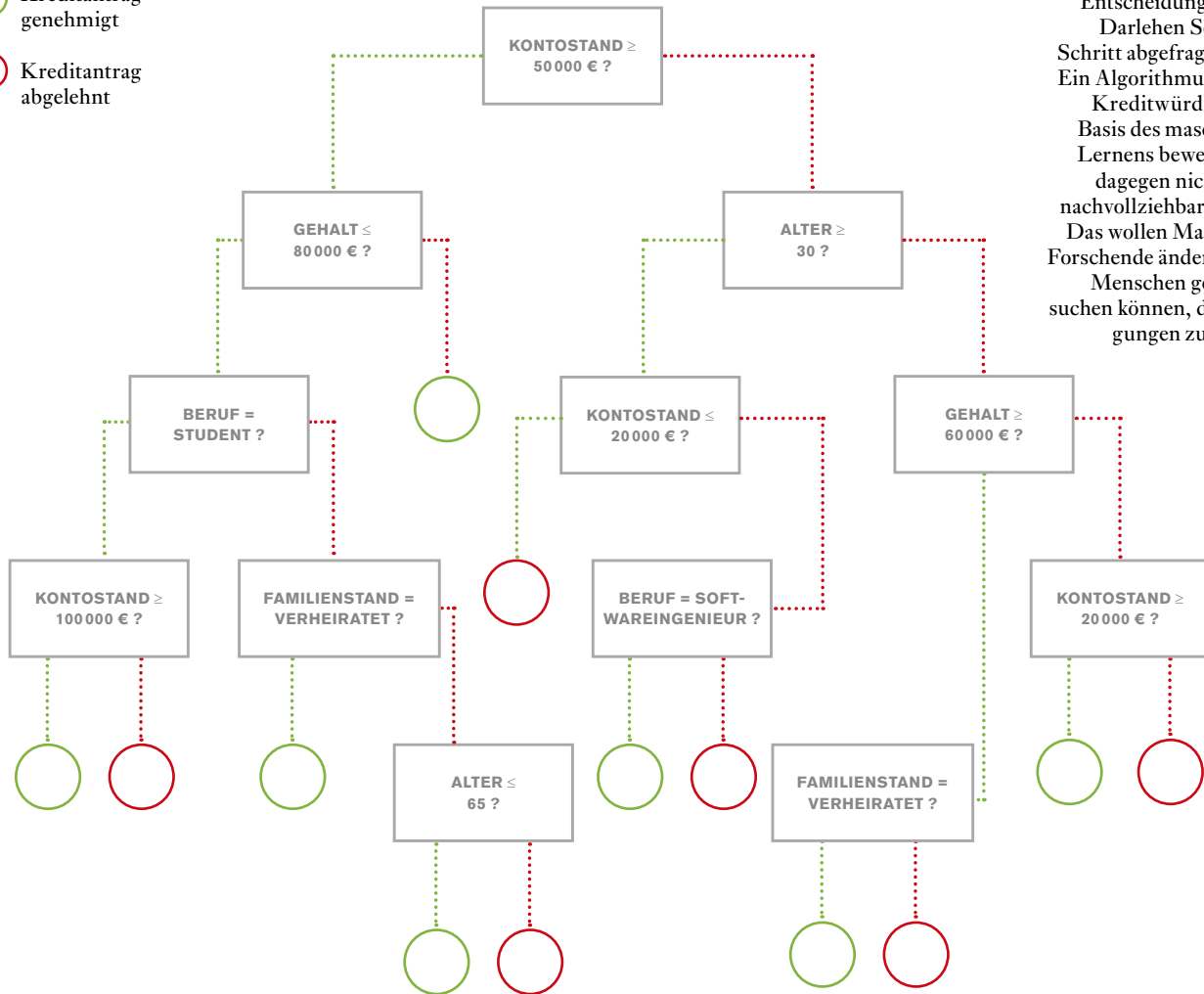
AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Algorithmen des maschinellen Lernens trainieren anhand großer Datenmengen, Muster zu erkennen, um etwa aus physiologischen Parametern auf eine Erkrankung zu schließen. Ursache und Wirkung verstehen sie jedoch nicht.

Forschende des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme wollen Computern ein Verständnis für Kausalitäten beibringen. Anders als etwa Kinder können Algorithmen die entsprechenden Modelle bislang nicht selbst erlernen, sie müssen von Menschen für spezielle Anwendungen entwickelt werden.

Die Max-Planck-Forschenden entwickeln kausale Modelle etwa für eine nachvollziehbare Kreditvergabe, für die Suche nach Exoplaneten oder für die klimapolitische Steuerung eines Wirtschaftssystems.

- Ja
- Nein
- Kreditantrag genehmigt
- Kreditantrag abgelehnt



Nachvollziehbare Kreditvergabe: In diesem Entscheidungsbaum ist klar zu erkennen, welche Kriterien bei der Entscheidung über ein Darlehen Schritt für Schritt abgefragt werden. Ein Algorithmus, der die Kreditwürdigkeit auf Basis des maschinellen Lernens bewertet, fällt dagegen nicht immer nachvollziehbare Urteile. Das wollen Max-Planck-Forschende ändern, damit Menschen gezielt versuchen können, die Bedingungen zu erfüllen.

GRAFIK: GCO NACH AMIR-HOSSEIN KARIMI/MPH FÜR INTELLIGENTE SYSTEME, TÜBINGEN

aber auch Unterschiede wie etwa ein höheres Einkommen für eine bestimmte Person. Doch da dieser Unterschied nicht real ist, gibt es natürlich auch keine experimentellen Daten, die bei der Beantwortung der Was-wäre-wenn-Frage helfen könnten. Um abzuschätzen, wie die parallele Welt aussehen könnte, treffen die Forschenden also Annahmen darüber, wie sich die relevanten Variablen, die den Algorithmus zur Ablehnung des Kredits geführt haben, zueinander verhalten.

Üblicherweise sind es harte Fakten wie Einkommen, Alter und Ausbildung beziehungsweise Laufzeit und Höhe des beantragten Kredits, die über die Vergabe entscheiden. Dazu kommen noch zusätzliche Variablen, die zwar schwer messbar ist, den Entscheidungsprozess aber dennoch beeinflussen. Beispiele hierfür wären Faktoren wie der kulturelle Hintergrund oder das Charisma des Antragsstellers, die sich in den Algo-

rithmus eingeschlichen haben. Sie werden als statistisches Rauschen zusammengefasst und müssen abgeschätzt werden. Im so entstandenen kausalen Modell lässt sich dann durchspielen, unter welchen Bedingungen eine Person den Kredit bekommen würde. Zu diesem Zweck wird jeweils eine Variable, etwa das Einkommen, verändert, während alle anderen Variablen gleich bleiben. „Schließlich sollte jeder in der Lage sein, durch einen gewissen persönlichen Aufwand seine Situation zu verbessern“, sagt von Kügelgen. „Dazu muss man aber erst einmal wissen, wie man gewisse Voraussetzungen am besten erfüllt. Und das können einem die bisher eingesetzten Algorithmen nicht sagen.“ Das zugrunde liegende kausale Modell, das beschreibt, wie die einzelnen Faktoren zusammenhängen, muss allerdings von einem Experten stammen. Ganz ohne einen Menschen, der Ahnung von der Sache hat, geht es also noch nicht. An der Kompetenz des



Menschen, kausale Zusammenhänge zu verstehen, scheint also in absehbarer Zeit auch im maschinellen Lernen noch kein Weg vorbeizuführen. Und unsere kognitiven Fähigkeiten können natürlich als Vorbild für die Entwicklung intelligenter Maschinen dienen. „Unser Gehirn hat sich im Laufe der Evolution so entwickelt, dass es uns zu höchst kooperativen und sozial interaktiven Tieren gemacht hat“, sagt Martin Butz, der an der Universität Tübingen die Gruppe für Cognitive Modeling leitet. „Das erfordert in unterschiedlichen Situationen extrem flexibles Verhalten.“ Deshalb verfügen wir auch über eine interne Modellstruktur, die uns sagt, wie die Dinge in unserer Umgebung miteinander interagieren, welches kausale Prinzip hinter den Zusammenhängen steckt und welche Absichten unsere Mitmenschen antreiben. Als rein reaktive Roboter, die lediglich Muster erkennen und von der Aussicht auf Belohnungen angetrieben werden, wären wir dazu nicht in der Lage.

KI-Systeme wie Alpha Zero, ein Programm, das sich 2017 selbst das Schachspielen beigebracht hat, beweisen zwar, dass mit genug Trainingszeit und Rechenleistung auch ein reaktives System komplexes Verhalten lernen kann. Im Vergleich zu der Welt, in der sich Menschen zurechtfinden müssen, ist ein Spiel mit 32 Figuren auf 64 Feldern allerdings recht überschaubar. Außerdem mag Alpha Zero zwar besser spielen als ein Mensch, verstanden hat das Programm das Spiel aber nicht. Deshalb ist es auch nicht in der Lage, jemandem zu erklären, wie man Schach spielt. „Im Gegensatz dazu versucht unser Gehirn unentwegt, Zusammenhänge zu erklären“, sagt Butz. Schon Kleinkinder verstehen kausale Zusammenhänge sozialer Situationen intuitiv. So zeigen etwa entwicklungspsychologische Experimente, wie sie einem Erwachsenen, der einen Stapel Bücher trägt, zum Öffnen einer Tür zu Hilfe eilen. Sie erkennen also sowohl die Absicht des anderen, die Türe zu öffnen, als auch die Ursache für die

Für mehr Transparenz: Julius von Kugelgen (links) und Amir Hossein Karimi entwickeln Modelle, die nachvollziehbare Entscheidungen über eine Kreditvergabe treffen.

**„Künstliche
Intelligenz trifft
immer öfter
Entscheidungen für
Menschen.“**

AMIR HOSSEIN KARIMI

FOTO: WOLFRAM SCHEIBLE FÜR MPG



Schwierigkeiten, nämlich die Bücher, aufgrund derer er keine Hand frei hat. Um in einer solchen Situation ähnlich kompetent zu reagieren, müssten Maschinen erst eine eigene Art interner Realität aufbauen, die nicht einfach nur immer wieder überschrieben wird, wenn man sie mit neuen Daten füttert. Sie müssten also in gewisser Weise ein konsistentes Verständnis der Welt ausbilden, wie es auch unserer Wahrnehmung zugrunde liegt. „Davon sind wir noch weit entfernt“, sagt Butz. „Andererseits gibt es aber auch keine Hinweise auf irgendeine Barriere, die es verhindern könnte, dass künstliche Systeme irgendwann menschliche Erkenntnisfähigkeit erreichen oder sogar übertreffen.“

Nicht nur soziale Interaktion und andere zeitliche Abläufe sind von Ursache und Wirkung geprägt, auch rein statische Darstellungen, etwa in Form von Fotografien, strotzen von kausalen Zusammenhängen. Sie stecken in den Mechanismen, die das Bild aufbauen,

wie etwa der Perspektive, dem eingesetzten Licht und der Unterscheidung zwischen Vorder- und Hintergrund. Nur wer die Zusammenhänge erkennt und voneinander trennen kann, bringt es zu einem robusten Verständnis vom Inhalt eines Bildes. Für Menschen ist das einfach. Wir erkennen etwa eine Tasse auch dann, wenn wir sie aus einer ungewöhnlichen Perspektive oder bei schwierigen Lichtverhältnissen sehen. Und im Gegensatz zu den Machine-Learning-Algorithmen musste dazu niemand uns als Kindern zehn Millionen Bilder von Tassen zeigen.

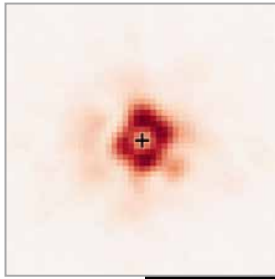
Ähnliche, wenngleich deutlich weniger intuitive Zusammenhänge spielen auch in der Astronomie eine Rolle, etwa bei dem Versuch, mit großen Teleskopen wie dem Very Large Telescope (VLT) in Chile Bilder von Exoplaneten aufzunehmen. Auf deren Aufnahmen ist von den Himmelskörpern in aller Regel nämlich nichts zu sehen. Da die Sterne viel heller leuchten, gehen die Planeten, die sie umkreisen, selbst fast vollständig im Rauschen unter. „Das ist in etwa vergleichbar mit dem Versuch, ein Glühwürmchen an einem mehrere Hundert Kilometer entfernten Leuchtturm zu fotografieren, dessen Scheinwerfer direkt ins Objektiv strahlt“, erklärt Timothy Gebhard. Um diese Aufgabe zu lösen, arbeitet er in der Abteilung für Empirische Inferenz an einem Algorithmus, der kausale Zusammenhänge ausnutzt, um den Aufnahmen des VLT trotzdem Bilder von Exoplaneten zu entlocken.

Um möglichst viele Daten zu sammeln, richten Astronomen ihre Teleskope gleich für mehrere Stunden auf einen Stern, in dessen Umgebung sie einen Planeten vermuten, und nehmen ein Video auf. Darauf ist um den Stern zunächst nur ein Flackern zu sehen, das vor allem durch Turbulenzen in der Erdatmosphäre verursacht wird. Gebhards Aufgabe besteht nun darin, die Tausende Bilder des Videos so zu kombinieren, dass daraus ein einziges Bild entsteht, auf dem der Planet möglichst klar zu erkennen ist. „In der Physik ist man in der luxuriösen Situation, ein gutes Verständnis der kausalen Zusammenhänge des Messvorgangs zu haben“, sagt der Forscher. Im Grunde zählt der Sensor des Teleskops einzelne Lichtteilchen, die vom Planeten selbst oder vom Stern stammen können, und dazu kommt dann noch das Rauschen aus der Atmosphäre und der Messelektronik. Außerdem wandert der Planet im Laufe der Aufnahme auf einer Kreisbahn um seinen Stern. Jedes Pixel enthält also Photonen, die verschiedene Ursachen haben können. „Wir versuchen, unser kausales Wissen über die Entstehung der Daten auszunutzen, um den Aufnahmen die im Rauschen verborgenen Details zu entlocken“, sagt Gebhard. Letztendlich hilft also auch hier das menschliche Gehirn dem künstlichen System beim Erkennen der Kausalitäten auf die Sprünge.

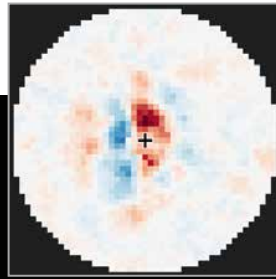
„Über Ursache und Wirkung nachzudenken, bleibt am Menschen hängen“, sagt auch Rüdiger Pryss, Professor für Medizininformatik am Institut für Klinische



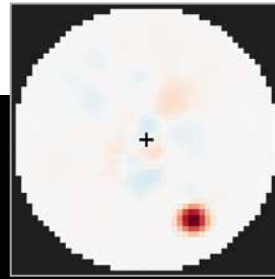
KALIBRIERTE DATEN



RAUSCHFREIE DATEN



GESCHÄTZTES SIGNAL



GRAFIE: ESO, EGO NACH T. MAGUIY, GERHARD
 MPH FÜR INTELLIGENTE SYSTEME, TUBINGEN

Taschenlampe vor einem Leuchtturm: Um einen Exoplaneten neben einem Stern zu identifizieren, lernt ein Algorithmus, dessen helles Licht aus den Daten zu entfernen. Dadurch werden in den Daten mit reduziertem Rauschen Strukturen sichtbar, die vorher verborgen waren. Wenn der Algorithmus nun viele solcher Bilder kombiniert und dabei berücksichtigt, dass sich der Planet in den Daten aufgrund der sich drehenden Erde bewegt, tritt das Signal des Planeten klar hervor.

30

Epidemiologie und Biometrie der Universität Würzburg. Oft geht es in der Medizin darum, in Patientendaten Muster zu finden, um die Patienten in Gruppen einzuteilen, für die jeweils spezifische Therapien gefunden werden können. Geschieht das mit den gängigen Methoden des maschinellen Lernens, bleibt aber die Frage, warum jemand in einer bestimmten Gruppe gelandet ist, oft unbeantwortet. Die Maschinen können die Gründe für ihre Entscheidungen nicht erklären, und der Mediziner bekommt auch zu wenige Anhaltspunkte, um sie nachvollziehen zu können. Gerade in der Medizin sei es aber unerlässlich, den Menschen an der richtigen Stelle einzubeziehen. Nur er kann den Ergebnissen der Algorithmen Sinn verleihen und muss letztlich auch die daraus abgeleiteten Therapieansätze verantworten. Rüdiger Pryss plädiert also dafür, nicht jedes Problem mit maschinellern Lernen „erschlagen“ zu wollen. „Es gibt sehr mächtige statistische Verfahren, die lange erprobt sind und oft besser zu einem speziellen Anwendungssystem passen“, erklärt der Medizininformatiker. Die seien teils so eindeutig, dass sie das Ursache-Wirkung-Problem weniger aufkommen ließen. Wegen des aktuellen KI-Hypes würden aber viele Anwender instinktiv auf maschinelles Lernen setzen.

Eine gesunde Skepsis gegenüber maschinellem Lernen als vermeintlichem Allheilmittel ist also sicher angebracht. Dennoch wäre es natürlich fahrlässig, ganz auf seine Stärken zu verzichten, vor allem wenn es um das vielleicht dringendste Problem unserer Zeit geht, den Klimawandel. Um auch hier kausale Zusammenhänge berücksichtigen zu können, entwickelt Michel Besserve von der Abteilung für Empirische Inferenz zurzeit einen Algorithmus, der die Effekte von Eingriffen in das globale Wirtschaftssystem automatisch vorhersagen kann. Er soll etwa Politikern in Zukunft dabei helfen, die optimale Strategie zu finden, welche einerseits den Ausstoß von Treibhausgasen minimiert und andererseits möglichst wenige Arbeitsplätze kostet. „Die große Herausforderung dabei ist, dass unser Wirtschaftssystem komplexe Wechselwirkungen zwischen einer Vielzahl von Akteuren mit unterschiedlichen Interessen aufweist“, sagt Besserve. Dabei passt jeder Akteur seine Handlungen an die der anderen an. Will man die Wirtschaft also als kausales Modell beschreiben, treten Kreisläufe auf, in denen sich einzelne Faktoren wechselseitig beeinflussen. „Das daraus resultierende Gleichgewicht zu berechnen, ist wesentlich schwieriger, als wenn die Kausalität immer nur in eine bestimmte

Richtung zeigt“, sagt Michel Besserve. Das zugrunde liegende, kausale Modell stammt aus der Ökonomie und beschreibt die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen von bis zu 50 unterschiedlichen Sektoren – von Stromerzeugung und Metallverarbeitung über Warentransport bis hin zu Fleischindustrie und Reisanbau. Das ermöglicht es dem Algorithmus, die Veränderungen der Gleichgewichte zu berechnen, die sich ergeben, wenn an einer bestimmten Stelle in das System eingegriffen wird. Dadurch könnten politische Entscheidungsträger bei ihren Überlegungen in Zukunft mehr Variablen berücksichtigen und gleichzeitig unvorhergesehene und unerwünschte Effekte ihrer Eingriffe auf die Wirtschaft vermeiden.

„Die Zeit drängt, und wichtige Entscheidungen müssen jetzt getroffen werden“, sagt Michel Besserve. „Daher ist es auch unser Ziel, das neue Werkzeug möglichst schnell zur Verfügung zu stellen und so mitzuhelfen, eine nachhaltige Ökonomie zu entwickeln.“ Sobald Maschinen also in der Lage sind, mit dem Konzept von Ursache und Wirkung umzugehen, könnten sie auch helfen, die ganz großen Aufgaben der Menschheit zu lösen.

www.mpg.de/podcasts/kuenstliche-intelligenz



SCHLÜSSELBEGRIFFE DER KÜNSTLICHEN INTELLIGENZ

ALGORITHMUS

heißt jede Art von Rechenvorschrift, mit der etwa Computerprogramme schrittweise eine Aufgabe lösen.

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ (KI)

wird ein nicht natürliches System, etwa ein Computerprogramm, genannt, das kognitive Fähigkeiten des Menschen nachahmt. Als starke KI wird ein System bezeichnet, das, wie der Mensch, unabhängig von einer konkreten Aufgabe lernfähig ist. Schwache KI heißt hingegen ein Algorithmus, der speziell für eine Aufgabe entwickelt wird.

MASCHINELLES LERNEN

ist der derzeit mit Abstand erfolgreichste und am meisten verfolgte Ansatz der künstlichen Intelligenz, bei dem ein Algorithmus mithilfe vieler Trainingsdaten lernt, in unbekanntem Daten Muster zu erkennen. Beispiele sind die Identifizierung von Gesichtern auf Bildern oder computergestützte Diagnosen auf Basis von physiologischen Daten.

ANZEIGE



GESELLSCHAFT BRAUCHT WISSENSCHAFT.
WISSENSCHAFT BRAUCHT GESELLSCHAFT.

DER DIALOG, EIN FORUM, DIE DUZ.

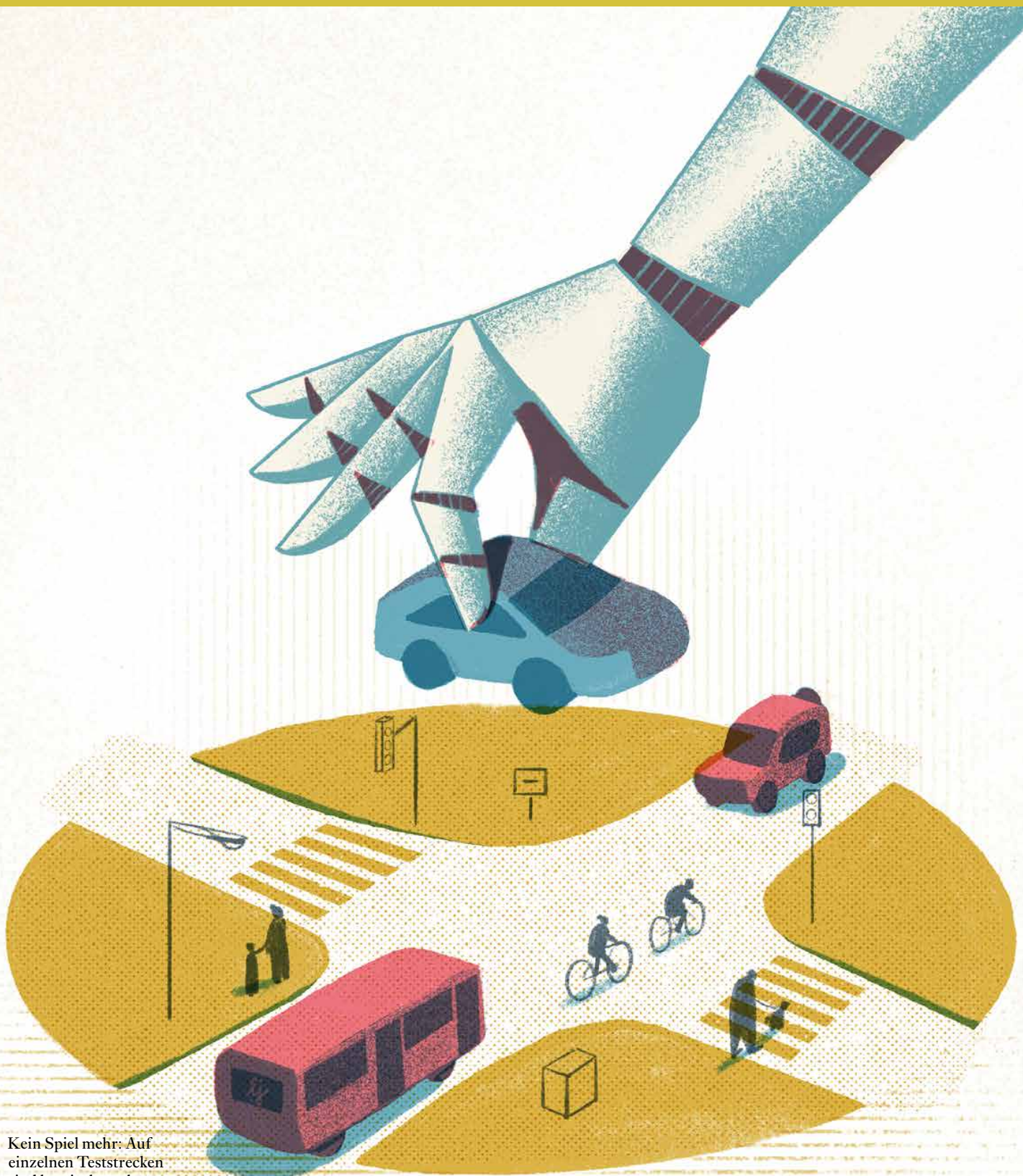
LESEN SIE DIE DUZ IM PROBEABONNEMENT:

3 AUSGABEN FÜR 15 EURO

[SHOP.DUZ-MEDIENHAUS.DE/DM-TESTEN.HTML](https://shop.duz-medienhaus.de/dm-testen.html)



//
unabhängig und
dialogorientiert
//



Kein Spiel mehr: Auf einzelnen Teststrecken sind bereits komplett autonom fahrende Fahrzeuge unterwegs. Doch laut Umfragen vertraut ihnen nur eine knappe Mehrheit der Autofahrer.

WENN MASCHINEN MITMISCHEN

TEXT: RALF GRÖTKER

Immer öfter treffen wir im Alltag auf künstliche Intelligenz: auf Chatbots im Callcenter, auf Roboterkollegen am Fließband oder auf elektronisch gesteuerte Mitspieler beim Gamen. Am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin untersucht Iyad Rahwan mit seinem Team, wie Menschen sich verhalten, wenn sie mit intelligenten Maschinen zu tun haben, und was sie von ihrem künstlichen Gegenüber erwarten.

„Fake News“ ist seit 2017, also ungefähr seit Donald Trump das Amt des Präsidenten der USA antrat, laut Duden ein offizieller Begriff der deutschen Sprache. Das Entstehen von Fake News ist eng gekoppelt an die Entwicklung von künstlicher Intelligenz. Ein Beispiel: Künstliche Intelligenz macht es möglich, Fake News in hoher Reichweite zu erstellen und in den sozialen Netzwerken massenhaft zu verbreiten. Verändert sich dadurch generell das Vertrauen, das wir in Medieninhalte haben? Verändern Fake News unser Verhalten? Für Iyad Rahwan, seit Ende 2018 Direktor des von ihm neu gegründeten Center for Humans and Machines am Berliner Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, ist dies eine typische Forschungsfrage. Gemeinsam mit seinem Team beantwortet er derartige Problemstellungen nicht mit Umfragen, sondern experimentell – um herauszufinden, welchen Effekt bereits existierende Technologien haben; und, mehr noch, um eine Idee davon zu bekommen, wie sich gerade in den Kinderschuhen befindliche Innovationen in Zukunft auswirken könnten. Das Forschungsprogramm des Centers fasst er in einem einzigen Satz zusammen: Welchen Einfluss haben digitale Technologien, soziale Medien und künstliche Intelligenz auf das menschliche Verhalten?

34

„Man muss sich nur einmal vorstellen, jemand hätte in den frühen 2000er-Jahren eine Vorstellung davon gehabt, wie sich Facebook und Twitter entwickeln werden, und er hätte Verhaltensexperimente durchgeführt, um zu antizipieren, wie sich die fortschreitende digitale Vernetzung auf die Verbreitung von Falschinformationen auswirken würde“, schwärmt Rahwan. „Man hätte die ganze Situation, die wir heute vorfinden, simulieren können, bevor sie eintrat.“ Das Experiment dazu? Im Fall von Fake News, schlägt der Wissenschaftler vor, könne ein Experiment darin bestehen zu untersuchen, wie gut Versuchspersonen es erkennen können, wenn aus existierenden Fotos Personen wegretuschiert werden – was mit Verfahren der künstlichen Intelligenz kinderleicht und für eine große Anzahl von Bildern möglich ist. Gleichzeitig könne man Experimente aufsetzen, um einen Eindruck davon zu bekommen, ob der Einsatz von KI-Verfahren Menschen besonders dazu animiert, andere via Fake News zu manipulieren – „nicht nur, weil die neuen Technologien Manipulationen einfacher machen, sondern auch, weil derjenige, der die Technologie einsetzt, sich quasi nicht selbst die Hände dreckig machen muss“.

Die Methoden, derer sich Rahwan bedient, sind improvisiert. Es gibt keine wissenschaftliche Disziplin, die in Gänze bereits die erforderlichen Instrumente bereitstellen würde. „Was wir machen, ist zum großen Teil Science-Fiction-Forschung. Es geht darum, Versuchs-

personen dazu zu bringen, sich Situationen vorzustellen, die sie noch gar nicht kennen – und in diesen Situationen Entscheidungen zu treffen.“ Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, mit denen er vorzugsweise zusammenarbeitet, kommen deshalb teils aus der wirtschaftswissenschaftlich geprägten Verhaltensforschung, die mit Simulationen und Laborexperimenten Erfahrung hat, aber auch aus der Psychologie, der Computerwissenschaft, der Anthropologie und der Soziologie.

Eine Forschungsarbeit, auf die Rahwan besonders stolz ist und die ihn auch weit über Fachkreise hinaus bekannt gemacht hat, ist ein Experiment mit dem Titel *Moral Machine*. Das Experiment wird seit Juni 2016 über eine frei zugängliche Onlineplattform durchgeführt. Mehrere Millionen Menschen aus 233 Ländern und Regionen nahmen bisher teil. Es wird weltweit in Science Centers und in Museen präsentiert und ist auch in zahlreiche Lehrbücher aufgenommen worden. Das Experiment präsentiert ein Dilemma: Ein automatisiert gesteuertes Fahrzeug hält auf eine Gruppe

FOTO: ARNE SÄTTLER FÜR MPG



Vielseitig: Iyad Rahwan hat Informatik studiert, interessiert sich aber auch für psychologische und philosophische Fragestellungen. Im Forschungsbereich Mensch und Maschine am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung bringt er diese Themenfelder zusammen.

von Fußgängern zu und kann nicht mehr rechtzeitig bremsen. Die künstliche Intelligenz, die das Fahrzeug steuert, kann sich nur noch entscheiden, entweder gegen eine Wand zu fahren (wobei die Insassen des Autos zu Schaden kommen) oder die Fußgänger zu überfahren. Was soll die künstliche Intelligenz tun? Auf welche Entscheidung hin soll sie von ihren Entwicklern trainiert werden? In dem Versuch wurden verschiedene Szenarien abgefragt, die sich unter anderem durch die Anzahl der Fahrgäste und der Fußgänger sowie deren Alter unterschieden. Die Resultate zeigen, dass die meisten mit ihren Entscheidungen versuchen, möglichst viele Menschenleben zu retten, und dass sie der Rettung jüngerer Menschen den Vorzug geben gegenüber der Rettung älterer Personen.

Eine Art Gleichnis

Warum sind solche Erkenntnisse von Belang? Das Szenario, das in dem Versuch präsentiert wurde, zeigt schließlich eine absolute Extremsituation – keine Situation, mit der sich Entwickler selbstgesteuerter Fahrzeuge vornehmlich beschäftigen. Zumindest im deutschen Rechtsrahmen ist es auch nicht vorgesehen, dass autonom gesteuerte Fahrzeuge Abwägungen vornehmen, wen sie im Ernstfall schützen und wen sie, wenn es nicht anders geht, zu Schaden kommen lassen sollten. In Gefahrensituationen, so sieht es die Vorschrift vor, muss das Fahrzeug einfach so schnell wie möglich zum Halten kommen. Punkt. „Man kann das Szenario auch als eine Art Gleichnis verstehen“, verteidigt Rahwan das Experiment. „Denn natürlich müssen selbstfahrende Autos darauf trainiert und programmiert werden, Entscheidungen zu treffen. Lässt man das Auto zum Beispiel näher in der Straßenmitte fahren, wo es mit entgegenkommenden Fahrzeugen kollidieren kann? Oder am Straßenrand, wo die Gefahr besteht, dass es einen Radfahrer streift? Statistisch betrachtet, haben solche Verhaltensregeln durchaus Einfluss darauf, welche Personengruppen zu Schaden kommen und welche eher nicht.“ Natürlich können ethische Fragen nicht dadurch gelöst werden, dass Menschen in einer Umfrage oder in einem Onlineexperiment entscheiden. „Aber die Politik und diejenigen, die Richtlinien erstellen, sollten zumindest wissen, wie gewöhnliche Leute über solche Fragen denken – auch deshalb, weil sie darauf gefasst sein müssen, ihre Entscheidungen vor einer Öffentlichkeit zu begründen, die vielleicht anderer Meinung ist als sie.“

35

„Natürlich müssen selbstfahrende Autos darauf trainiert werden, Entscheidungen zu treffen.“

IYAD RAHWAN

Ein herausstechendes Merkmal von Iyad Rahwans Forschungsarbeiten ist, dass er seine Experimente immer wieder neu erfindet. Die meisten arbeiten mit einer Story, die sich aus vielen Blickwinkeln interpretieren

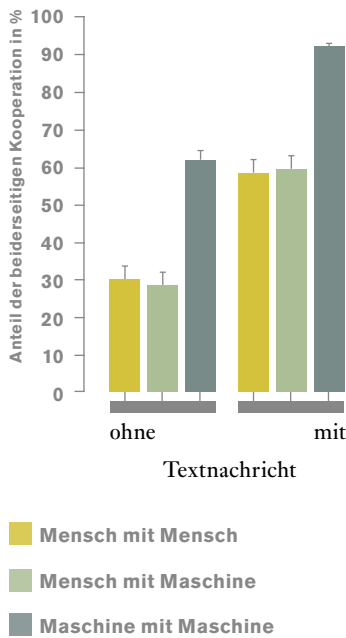


lässt. Gleichzeitig liefern sie im Resultat solide quantitative Ergebnisse. Wie gelangt man zu solchen Forschungsdesigns? „Wichtig ist, dass man es sich erlaubt, offen zu bleiben, und bei einer Fragestellung nicht immer sofort daran denkt, ob sie sich überhaupt mit geeigneten Methoden untersuchen lässt. Man muss wirklich versuchen, die interessanteste Frage zu finden“, meint Rahwan. Was außerdem hilft, ist der Blick über den eigenen Tellerrand. „Ich lese viele populäre Wissenschaftsbücher. Oft komme ich dabei auf Ideen für meine eigene Arbeit. Mein Projekt über die Kooperation zwischen Menschen und Maschinen beispielsweise war vor allem inspiriert von Sachbüchern, die ich zum Thema Kooperation zwischen Menschen gelesen hatte.“ Populäre Wissenschaftsbücher helfen laut Rahwan nicht nur, wissenschaftliche Inhalte einer größeren Öffentlichkeit bekannt zu machen. Sie helfen auch Wissenschaftlern, interdisziplinär zu arbeiten. „Wenn ich in einem fremden Feld stöbere, ist es schwierig für mich, unter den vielen Artikeln aus Fachzeit-

schriften genau die zu finden, die mich weiterbringen. Bei Wissenschaftsbüchern, die für einen breiteren Leserkreis konzipiert sind, hat hingegen schon eine gewisse Selektion stattgefunden.“

In dem erwähnten Projekt zur Kooperation von Menschen und Maschinen testete Rahwan, wie künstliche Intelligenzen zusammenarbeiten können – untereinander und mit Menschen. „Es gibt viele Diskussionen darüber, ob Computer den Menschen ersetzen können. Und die meisten Tests, die es gibt, um das Potenzial von künstlicher Intelligenz zu testen, laufen mit Spielen wie Schach oder Go, wo es immer einen Gewinner und einen Verlierer gibt. Die Interaktionen aber, die in der Realität stattfinden, sehen anders aus.“ Die Forschenden untersuchten die Kooperation von Maschinen mit Menschen oder untereinander mithilfe von Kooperationsspielen aus der Spieltheorie. Das bekannteste Kooperationsspiel ist das Gefangenendilemma, in dem zwei Spieler entscheiden müssen, ob sie sich gegenseitig verraten, wenn sie separat als Zeugen befragt werden. Verrät ein Spieler den anderen, zieht er daraus den größten Vorteil, solange der andere schweigt. Halten beide zusammen und sagen nichts, kommen sie immer noch besser weg, als wenn beide den jeweils anderen verraten.

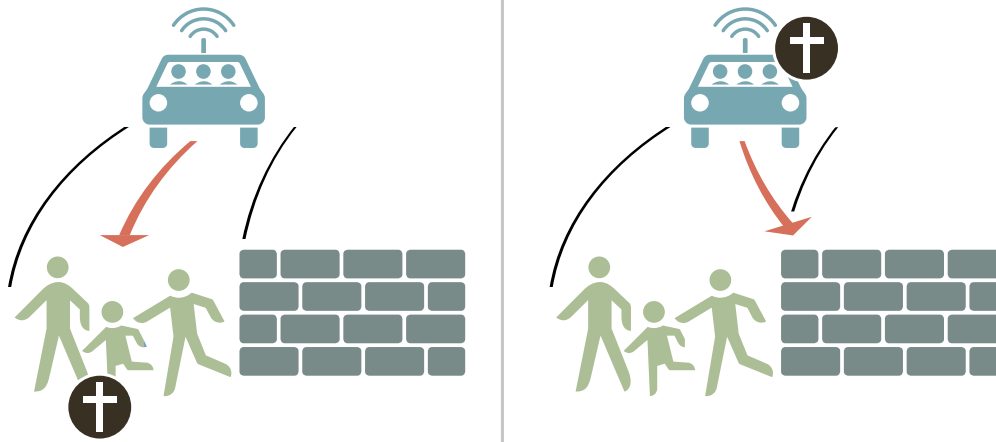
ZUSAMMENARBEIT ZWISCHEN MENSCH UND MASCHINE



In einem Kooperationsspiel arbeiteten Menschen und Maschinen zunächst nur schlecht zusammen. Als die Beteiligten Textnachrichten austauschen konnten, stieg die Kooperationsbereitschaft deutlich.

Menschliche Züge fördern Kooperation

Rahwan und sein Team testeten das Spiel mit 25 verschiedenen KI-Typen, die Verfahren des maschinellen Lernens anwenden. Die Resultate waren zunächst eher frustrierend. Die meisten Algorithmen schienen mehr oder weniger unfähig zur Kooperation, und selbst der am besten funktionierende Algorithmus konnte nicht erfolgreich mit Menschen kooperieren. Interessant wurde es erst, als das Team sowohl den menschlichen Spielern als auch dem siegreichen Algorithmus aus der ersten Versuchsrunde die Möglichkeit gab, eine Nachricht auszutauschen. Konkret konnten sowohl die menschlichen wie die maschinellen Spieler zu Beginn jeder Runde eine Textnachricht mit Sätzen wie „Tu, was ich sage, oder ich bestrafe dich“, „Ich ändere jetzt meine Strategie“ oder „Gib mir noch eine Chance“ an den Mitspieler senden. Dazu konnten sie sich aus einem vorgegebenen Pool von Textnachrichten bedienen. Getestet wurden sowohl Szenarien, in denen die menschlichen Spieler lügen konnten, als auch Szenarien, in denen dies nicht der Fall war. Die Algorithmen konnten grundsätzlich nicht lügen. Keiner der Spieler kannte die Identität des Gegenübers. Der erstaunliche Effekt: In den Versuchsläufen ohne zusätzliche Textnachricht-



Dilemma: Wie soll ein selbstfahrendes Auto handeln, wenn es nicht mehr rechtzeitig bremsen kann? Befragungen zeigen, dass eine Mehrheit dafür ist, möglichst viele Menschenleben zu retten.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Forschende um Iyad Rahwan gehen der Frage nach, welchen Einfluss digitale Technologien auf das menschliche Verhalten haben.

In Experimenten mit Testpersonen untersuchten sie zum Beispiel, unter welchen Voraussetzungen Menschen und Maschinen kooperieren.

Ein weiterer Versuch befasste sich mit ethischen Vorgaben für selbstfahrende Autos.

ten führten Spiele im Szenario „Mensch mit Mensch“ und auch im Szenario „Maschine mit Mensch“ nicht zu besonders kooperativem Verhalten. Das Szenario „Maschine mit Maschine“ schnitt etwas besser ab. Sobald jedoch Textnachrichten als Zusatzelement eingeführt wurden, verdoppelte sich in allen drei Szenarien die Kooperationsbereitschaft.

Diese Resultate zeigen dreierlei. Erstens: Selbst ohne die Fähigkeit zur Kommunikation ist die Kooperationsbereitschaft künstlicher Intelligenzen höher als die des Menschen. Zweitens: Die Kooperationsleistung künstlicher Intelligenzen kann erhöht werden, wenn ihr menschliche Züge verliehen werden. Wenn sie kommunizieren können, stellen künstliche Intelligenzen in Sachen Kooperationsbereitschaft alle Teams, an denen Menschen beteiligt sind, deutlich in den Schatten. Drittens: Menschen reagieren anders auf eine künstliche Intelligenz, wenn diese kommuniziert. Tatsächlich konnten in den Experimenten mit Textchat die menschlichen Versuchsteilnehmenden in vielen Fällen die Maschine nicht mehr von einem menschlichen Gegenüber unterscheiden. Ob es einen Grund dafür gibt, dass Algorithmen im Kooperationsspiel er-

folgreicher abschneiden als Menschen? „Eine Ursache könnte sein, dass Maschinen sich treu bleiben. Wenn sie mehrere Spielrunden erfolgreich hinter sich gebracht haben, in denen sie von der erlaubten Möglichkeit des nichtkooperativen, auf Eigennutz bedachten Verhaltens keinen Gebrauch gemacht haben, dann werden sie auch in weiteren Runden die Kooperation nicht abbrechen. Menschen ticken hier anders, auch wenn sie mit dieser Strategie beinahe immer verlieren“, meint Iyad Rahwan. Ein anderer Grund könne sein, dass Menschen sich oft an die Zusagen, die sie im Textchat gemacht hatten, nicht gehalten haben. Auch das führt dazu, dass der gemeinsam erzielte Spielerfolg sich verringert.

Gibt es Dinge, die ein Computer oder eine KI niemals wird tun können? „Schlussendlich, glaube ich, gibt es nichts, was eine KI nicht kann“, sagt Iyad Rahwan. „Aber zumindest für die nähere Zukunft sehe ich dort Grenzen, wo Menschen miteinander auf eine Weise interagieren, die ein tieferes psychologisches Verständnis erfordert. Maschinen sind hier deshalb im Nachteil, weil sie nur durch Beobachtung aus menschlichem Verhalten lernen können. Sie können nicht aus den Erfahrungen der eigenen Lebensgeschichte schöpfen und diese Erfahrungen in die Interpretation einer Situation einbringen.“

www.mpg.de/podcasts/kuenstliche-intelligenz





ILLUSTRATION: LUISA JUNG FÜR MPG

EINE SOFTWARE SCANNT DIE PSYCHE

TEXT: ANDREAS LORENZ-MEYER

Nur schlapp oder schon depressiv? Introvertiert oder autistisch? Fantasievoll oder schizophran? Die Symptome psychiatrischer Erkrankungen sind nicht immer eindeutig. Für die Früherkennung setzt Nikolaos Koutsouleris, Fellow am Max-Planck-Institut für Psychiatrie, deshalb auch auf künstliche Intelligenz. Algorithmen sollen Muster in den genetischen und physiologischen Daten von Patienten und Patientinnen erkennen und so die ärztliche Expertise ergänzen.

Ein ganz normaler Tag im Büro. Plötzlich eine Stimme: „Du hast diesen Job nicht verdient!“ Die junge Frau dreht sich um, aber niemand ist da. Ihre Kollegen sitzen konzentriert an ihren Schreibtischen. Hat sie sich das nur eingebildet? Manchmal beschleicht sie das Gefühl, die anderen würden sie beobachten und kontrollieren und hinter ihrem Rücken schlecht über sie sprechen. Außerdem würden sie ihr gegenüber versteckte Andeutungen und abwertende Gesten über ihre Leistung machen. Sind diese Gedanken zunächst noch diffus und leicht zu verdrängen, nehmen sie im Laufe der Zeit immer bedrohlichere Ausmaße an. Nach zehn Monaten dann werden aus Gedanken im Kopf Stimmen, die von anderen Menschen zu stammen scheinen. Sie melden sich immer öfter und beschimpfen die 24-Jährige. Sie hält dagegen, streitet mit ihnen. Sie kann sich nicht mehr richtig konzentrieren, bei der Arbeit unterlaufen ihr immer öfter Fehler. Ist sie verrückt? Schließlich sucht sie sich Hilfe. Die Diagnose: schizophrene Psychose. – Sind die ersten Symptome so eindeutig wie in dem hier beschriebenen Fall, lässt sich

leicht erkennen, dass eine Psychose droht. Der Ausbruch der Krankheit kann am ehesten verhindert werden, solange nur Vorformen von Wahnvorstellungen oder Halluzinationen auftreten, die noch nicht als unverrückbare Wirklichkeit betrachtet werden. Bei anderen Hochrisikopatienten sind die Symptome hingegen schwerer einzuordnen: Sie schlafen schlecht, fühlen sich schlapp, sind dünnhäutig, unkonzentriert und interesselos, bewältigen Alltag und Beruf kaum noch, brechen Kontakte ab. Da bleibt eine nahende Psychose oftmals unentdeckt.

Mit künstlicher Intelligenz will Nikolaos Koutsouleris das Risiko für eine Entwicklung derartiger psychiatrischer Erkrankungen künftig besser vorhersagen. Mathematische Modelle sollen zuverlässige Prognosen darüber erlauben, wer schwer erkranken könnte und bei wem mit einem milderem Verlauf zu rechnen ist. Dem Computer kommt hier eine unterstützende Rolle zu: Es geht darum, Ärzten und Psychotherapeutinnen dabei zu helfen, Zusammenhänge aus den Patienten-

Das Gesicht ist der Spiegel der Seele. Doch manche Menschen können dieses Spiegelbild nicht richtig interpretieren. Daher sind neuropsychologische Tests Bestandteil der Prognose für psychiatrische Erkrankungen. Ein Computerprogramm bezieht bei der Erstellung der Prognose die Fähigkeit eines Menschen mit ein, Gesichtsausdrücken bestimmte Gefühle zuzuordnen.



FOTO: JARDUL/ISTOCK

daten herauszufischen, die ihnen vielleicht entgangen wären – nicht darum, die Fachleute zu ersetzen. Die häufigste Form einer schizophrenen Psychose ist die paranoide Schizophrenie: 0,5 bis 1 Prozent der Bevölkerung leiden darunter. Die Patienten haben Halluzinationen, Wahnvorstellungen und Störungen der Ich-Grenzen – also das Gefühl, von außen gesteuert zu werden, und die Vorstellung, dass sich Gedanken auf bekannte und fremde Menschen ausbreiten können. Sie glauben, dass sie verfolgt werden oder andere ihre Gedanken stehlen. Menschen mit genetischer

Vorbelastung sind besonders gefährdet. Leiden beide Elternteile an einer Schizophrenie, liegt das Erkrankungsrisiko für ihre Kinder bei 45 Prozent. Bislang ist es aber noch nicht gelungen, Gene ausfindig zu machen, auf die sich die Schizophrenie eines Menschen zurückführen lässt. Man kennt nur Varianten im Erbgut, die das Risiko eines Menschen erhöhen, an psychotischen Störungen zu erkranken. Zu diesen Risikogenen kommen Umweltfaktoren hinzu: Stress und negative Erlebnisse wie zum Beispiel der Tod eines geliebten Menschen oder der Verlust des Arbeitsplatzes können den Ausbruch einer Psychose begünstigen.

Das komplexe Zusammenspiel all dieser Faktoren macht die Prognose so schwierig, ob die Erkrankung ausbrechen und wie schwer sie gegebenenfalls verlaufen wird. Wüssten Ärztinnen beispielsweise, ob ein Patient kurz vor einem Krankheitsschub steht, könnten sie ihn gezielt behandeln. Doch noch gibt es eine solche zuverlässige Früherkennung nicht.

Nikolaos Koutsouleris arbeitet daran, dies zu ändern. Vor fünfzehn Jahren rekrutierte und untersuchte er Patienten für eine Studie an der Ludwig-Maximilians-Universität München zur Früherkennung von Psychosen. „Ich konnte verfolgen, wie bei jungen Patienten im Hochrisikostadium aus milden Symptomen schwere Erkrankungen wurden und wie unterschiedlich diese verliefen.“ Er erkannte aber auch, dass die klassischen

statistischen Prognoseverfahren nicht weiterhelfen: „Zur Berechnung individueller Prognosen taugen die Verfahren bis heute nicht, da sie keine komplexen Muster erkennen. Aber genau das wäre zur Früherkennung psychischer Erkrankungen nötig – diese lassen sich ja nicht auf ein einziges Gen oder eine bestimmte Schädigung des Gehirns zurückführen.“ Noch immer fehlt es an Wissen darüber, wie die mannigfaltigen Erscheinungsformen von Psychosen mit der Palette an Risiko-

faktoren zusammenhängen. „Eine Herkulesaufgabe, die nur künstliche Intelligenz bewältigen kann“, so Koutsouleris.

Schon als Koutsouleris mit seiner Forschung begann, setzten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf maschinelles Lernen, um neurodegenerative Erkrankungen wie Parkinson oder Alzheimer zu diagnostizieren. Doch niemand dachte damals daran, diese Technik auch in der Psychiatrie einzusetzen. Koutsouleris dagegen erkannte das enorme Potenzial, das künstliche Intelligenz für die Anwendung von Wissen aus der Grundlagenforschung auf psychiatrische Erkrankungen besitzt. Gleichzeitig war ihm bewusst, dass er maschinelle Lernverfahren entwickeln musste, welche für Ärztinnen und Ärzte leicht einzusetzen sind, denn Informatik ist auch heute noch nicht Teil des Medizin- oder Psychologiestudiums.

NeuroMiner soll Ärzte und Ärztinnen unterstützen

Koutsouleris brachte für dieses Vorhaben perfekte Voraussetzungen mit. Als Facharzt für Psychiatrie und Psychotherapie an der Universität München und als Programmierer – er hatte sich während seiner Doktorarbeit mehrere Programmiersprachen beigebracht – ist er in beiden Welten zu Hause. So ist es ihm gelungen, in etwas mehr als zehn Jahren NeuroMiner zu entwickeln – ein Programm, das mit verschiedenen Algorithmen arbeitet. Wenn unklar ist, welche Berechnungsmethode am besten geeignet ist, kommen einfach mehrere zum Einsatz. Die Ergebnisse werden miteinander verglichen und die beste Methode ausgewählt. Außerdem steht ein Meta-Algorithmus zur Verfügung, der verschiedene Algorithmen kombiniert und dann die Kombination auswählt, welche die genaueste Vorhersage liefert. Mit seinem Team entwickelt Koutsouleris die Software kontinuierlich weiter.

Für die Anwendung von NeuroMiner ist keine Programmiererfahrung nötig. „Es lässt sich ganz ohne Vorkenntnisse zur Analyse unterschiedlicher Daten einsetzen.“ Zunächst füttert der Arzt das Programm beispielsweise mit Daten aus Erbgutanalysen und medizinischen Untersuchungen eines Psychosepatienten. Als Nächstes sucht er einen Algorithmus aus und trainiert diesen auf die Erkennung der Erkrankung. NeuroMiner findet dabei selbstständig die Einstellungen des ausgewählten Algorithmus, die eine optimale Vorhersage von Psychosen erlauben. Zudem wird die Verallgemeinerbarkeit der gelernten Einstellungen geprüft. Kann der Algorithmus anhand der eingegebenen Daten eine sinnvolle Vorhersage machen? Stimmt die „gelernte“ Entscheidungsfunktion mit der Fachliteratur zur Erkrankung überein?

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ein Teil der Patientinnen und Patienten mit hohem Psychoseerisiko weist unspezifische Symptome auf. Je früher eine Gefährdung erkannt wird, desto besser sind die Erfolgsaussichten einer Behandlung.

Künstliche Intelligenz soll künftig die Früherkennung von Menschen verbessern, die mit hoher Wahrscheinlichkeit eine psychiatrische Erkrankung entwickeln werden.

Mit dem Programm NeuroMiner können Prognosemodelle erstellt werden, die messen, ob ein Mensch mit hohem Risiko eine psychotische Erkrankung entwickeln wird. Das Programm wertet dafür psychiatrische, medizinische und genetische Parameter aus und bezieht auch die Expertise der behandelnden Ärztinnen und Ärzte mit ein.

Psychiatrie und Informatik – Nikolaos Koutsouleris ist in beiden Welten zu Hause. So konnte er maschinelle Lernverfahren zur Prognose psychiatrischer Erkrankungen entwickeln. Sein Ziel: ein digitaler Assistent für die psychische Gesundheit.

Damit ist das Training beendet. Der Algorithmus kann nun für andere Patienten und Patientinnen das Risiko berechnen, an einer Psychose zu erkranken. Der Nutzer kann sein Modell auch mit Kollegen teilen und diese die Zuverlässigkeit prüfen lassen. Schneidet das Modell auch hier gut ab, ist es bereit für klinische Studien. Ein Hin- und Herspringen zwischen den einzelnen Schritten lässt NeuroMiner nicht zu, damit Nutzer ihr Modell nicht zu eng an die Trainingsdaten anpassen und daher ungenaue Vorhersagen erhalten.

Neuer Algorithmus

42 Anfang diesen Jahres hat Koutsouleris einen Algorithmus veröffentlicht, der den Einsatz künstlicher Intelligenz in der Psychiatrie auf eine neue Stufe hebt. Mit diesem lassen sich zuverlässig Prognosen für 15- bis 40-jährige Patienten in verschiedenen Hochrisikostadien für paranoide Schizophrenie oder für Menschen mit Depression erstellen. „Viele Betroffene spüren bereits im Hochrisikostadium einen hohen Leidensdruck. Sie erleben „Gedankenstürme“ oder tun sich schwer, bloße Vorstellungen von der Realität zu unterscheiden“, erklärt Koutsouleris. Liegen solche Hochrisikokriterien wie leichte psychotische Symptome oder eine familiäre Belastung mit Psychosen zusammen mit verminderter Leistungsfähigkeit vor, steigt das Psychoserisiko auf 14 bis 20 Prozent. Der Algorithmus kann mit einer Genauigkeit von 83 bis 85 Prozent voraussagen, ob die Betroffenen tatsächlich innerhalb von zwei Jahren eine Psychose entwickeln werden.

Der Algorithmus geht dabei in mehreren Schritten vor. Zunächst befragen die Ärzte ihre Patienten und Patientinnen und führen neuropsychologische Tests durch. So wird zum Beispiel überprüft, wie gut sie emotionale Gesichtsausdrücke richtig zuordnen können. Daraus errechnet das Programm die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung einer Psychose. Außerdem gibt es an, ob die vorliegenden Daten für eine sichere Prognose ausreichen. Falls nicht, geben die Mediziner im nächsten Schritt ihre eigene Einschätzung an. Damit kombiniert der Algorithmus die Expertise von Mensch und Maschine. Reicht die prognostische Sicherheit auch dann nicht aus, werden genetische Risikofaktoren aus einer Erbgutanalyse berücksichtigt. Das Programm identifiziert alle mit der Entstehung von Psychosen zu-



FOTO: AXEL GRIESCH FÜR MFG

„Nur wenn Ärzte und Patienten verstehen, wie der Algorithmus arbeitet, werden sie seinen Ergebnissen vertrauen.“

NIKOLAOS KOUTSOULERIS

sammenhängenden Mutationen und gewichtet sie nach Relevanz. Zusätzlich kann das Gehirn mittels Magnetresonanztomografie untersucht werden. „Bei 40 Prozent der Patienten müssen all diese Faktoren einkalkuliert werden; insbesondere bei jenen, denen gleich zu Beginn ein hohes Psychoserisiko bescheinigt wurde. Dadurch reduziert der Algorithmus die Anzahl der Fälle, in denen sonst fälschlicherweise eine Psychose prognostiziert worden wäre“, sagt Koutsouleris.

Zuverlässigkeit und Transparenz

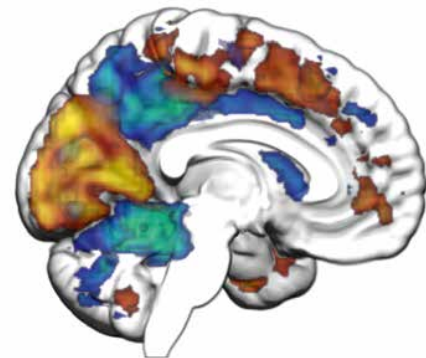
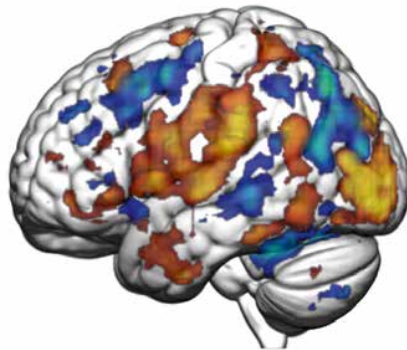
Entscheidend für die Akzeptanz der künstlichen Intelligenz in der Psychiatrie ist neben der Zuverlässigkeit aber auch Transparenz. „Sie ist der Schlüssel zur klinischen Anwendung! Nur wenn Ärzte und Patienten verstehen, wie der Algorithmus arbeitet, werden sie seinen Ergebnissen Vertrauen schenken.“ Zwar lassen sich jetzt schon die Muster verfolgen, die der Vorhersage-Algorithmus gelernt hat. Aber wie genau das Programm zu seinem Ergebnis kommt, können die Forschenden damit noch nicht erklären. Koutsouleris und

pressiven Patienten oder zur Prognose der Erfolgsaussichten einer Magnetstimulation bei Schizophrenie.“

Künstliche Intelligenz könnte also zu einem Paradigmenwechsel in der Versorgung psychisch Erkrankter führen: weg vom bloßen Management chronischer Erkrankungen, hin zu einer vorbeugenden Medizin, die nicht nur Defekte oder Symptome behandeln, sondern auch die Widerstandsfähigkeit des Patienten stärken will. Früherkennungsambulanzen sind noch relativ ineffizient, da sie zu lange für eine Prognose des Erkrankungsrisikos benötigen. Mit künstlicher Intelligenz soll das viel schneller gehen. Eine vorbeugende Psychiatrie könnte schon bald eine konkrete Prognose über das Erkrankungsrisiko eines Patienten erstellen und eine auf ihn zugeschnittene Behandlung anbieten. Ein persönlicher „digitaler Assistent für die psychische Gesundheit“ würde ihm zum Beispiel Zugang zu einem Netzwerk individualisierter Hilfsangebote verschaffen.

Und so könnte der eingangs beschriebene Krankheitsverlauf mithilfe der künstlichen Intelligenz eine andere Wendung nehmen: Kurz nach Auftreten erster diffuser Symptome überweist der Hausarzt die Patientin an eine Hochrisikoambulanz. Dort werden die Ergeb-

Vom Computer gelerntes Prognosemuster: Für Patienten, die in den roten Arealen weniger und in den blauen Regionen mehr Hirnvolumen haben, prognostiziert der Algorithmus ein erhöhtes Erkrankungsrisiko – je ausgeprägter das Muster, desto höher das Risiko. Bei umgekehrter Volumenverteilung ist das Erkrankungsrisiko gering.



sein Team haben deshalb eine Software programmiert, die die Gewichtung der verschiedenen Parameter berechnet. Damit können sämtliche Rechenschritte von NeuroMiner nachvollzogen werden.

Inzwischen gibt es mehrere, an unabhängigen Stichproben getestete Vorhersagemodelle. Nun soll eine klinische Studie zeigen, ob ihr Einsatz tatsächlich erfolgreichere Therapien zur Folge hat. „Es wird in den nächsten Jahren viele neue Projekte geben, die den Einsatz von künstlicher Intelligenz in der klinischen Praxis der Psychiatrie erproben – etwa zur Vorhersage psychischer Erkrankungen bei Hochrisikopersonen und de-

nisse von Gehirn- und Genuntersuchungen am Computer analysiert und ein Erkrankungsrisiko von 85 Prozent ermittelt. Die Ärzte empfehlen daraufhin eine individuell angepasste Behandlung aus Verhaltenstherapie, Änderungen im Lebensstil und niedrig dosierten Antidepressiva. Von nun an wird das Erkrankungsrisiko der Patientin in der Ambulanz regelmäßig überprüft. Darüber hinaus misst die Patientin selbst in Echtzeit bestimmte Warnsignale mit einer App. Diese meldet, wenn sich Symptome und Verhaltensmuster verschlechtern und ein Fortschreiten der Erkrankung zu befürchten ist.

www.mpg.de/podcasts/kuenstliche-intelligenz



VOM GESTIRN ZUM GEHIRN

Was hält Materie zusammen? Was das Universum? Was macht das menschliche Denken aus? Es waren schon immer die großen Fragen, die Charlotte Grosse Wiesmann vom Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften beschäftigt haben. Inzwischen untersucht die Forscherin, die eigentlich Physik studiert hat, welche Entwicklungen im Gehirn es ermöglichen, dass Kinder sich in andere hineinversetzen können.

TEXT: CATARINA PIETSCHMANN

Es ist einer dieser brütend heißen Julitage in Berlin-Prenzlauer Berg, an denen man nur Schatten sucht. Durch die geöffneten Fenster der Altbauwohnung perlen kurze Klangfolgen eines Glockenspiels. Sie kommen von der nahen Kulturbrauerei. Eine Wasserkaraffe mit Zitronenscheiben und Minze steht auf dem Tisch. Charlotte Grosse Wiesmann schenkt zwei Gläser ein und setzt sich wieder in den Sessel. Ihr Arbeitsplatz ist eigentlich das Leipziger Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, wenig mehr als eine ICE-Stunde von Berlin entfernt. Zeit, die sie gut nutzen kann, um Fachliteratur zu lesen oder Artikel zu schreiben. Doch wegen Corona arbeitet die Neuropsychologin im Homeoffice. Und das, mit kurzen Unterbrechungen, bereits seit März 2020. Die Hygienerichtlinien am Institut sind sehr streng. Besonders für Forschende, die wie sie mit Kleinkindern arbeiten. Entsprechende Studien waren – sehr zum Frust ihrer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter – für

lange Zeit ausgesetzt. Erst kürzlich ging es für das Team der 35-Jährigen, zu dem ein Philosoph, eine Biomedizinerin, zwei Psychologinnen und eine Mathematikerin gehören, wieder los. Nur mit Masken und negativem Lolli-Test der Kids, versteht sich.

Charlotte Grosse Wiesmann leitet am Institut die Minerva-Fast-Track-Forschungsgruppe „Meilensteine früher kognitiver Entwicklung“. Sie erforscht, wann und warum kleine Kinder in der Lage sind, sich in andere hineinzuversetzen. Ab wann sie verstehen, dass andere Menschen sich ein Bild von der Welt machen, das von ihrem eigenen auch abweichen kann. Diese mentale Fähigkeit – in der Fachwelt Theory of Mind genannt – ist für das menschliche Zusammenleben unerlässlich. Entsprechende Defizite, wie sie beispielsweise Menschen mit Autismus oder Schizophrenie haben, führen zu Problemen im Zwischenmenschlichen. Theory of Mind ist etwas spezifisch Menschliches. Selbst andere Primaten verstehen sich darauf vermutlich nur ansatzweise. Vielleicht kein Wunder, denn die Fähigkeit, sich in andere hineinzuversetzen, scheint in Zusammenhang zu stehen mit einer anderen typisch menschlichen Fähigkeit: sich sprachlich ausdrücken zu können.

„Wenn wir deuten, was ein anderer denken könnte, sagen wir Dinge wie: Er denkt, dass... Ich wollte wissen, ob Kinder in dem Alter, in dem sie solche Satzkonstruktionen erlernen, auch lernen, sich in andere hineinzuversetzen“, erzählt die Forscherin. Um die Aufmerksamkeit der Kinder für die Verhaltenstests zu wecken, inszeniert sie spielerische Situationen. Da packt zum Beispiel eine Plüschmaus ein Gummibärchen in eine Tüte und macht danach ein Nickerchen. „Währenddessen nehmen

→

BESUCH BEI

CHARLOTTE
GROSSE WIESMANN



FOTO: DAVID AUSSERHOFER FÜR MPG

45

Schätzt tiefe Einblicke: Charlotte Grosse Wiesmann untersucht Meilensteine in der kindlichen Gehirnentwicklung, indem sie das Verhalten von Kindern testet und deren Hirnaktivität misst.

wir mit dem Kind das Gummibärchen heraus und legen es in eine Kiste. Dann fragen wir das Kind, wo die Maus es wohl suchen wird, wenn sie aufwacht“, erzählt Grosse Wiesmann. Während Zweibis Dreijährige ausnahmslos auf die Kiste zeigen, sagen Vierjährige: in der Tüte. „Sie verstehen also, dass die Maus denkt, das Gummibärchen sei noch dort, wo sie es versteckt hat.“ Den Jüngeren gelingt dieser Perspektivwechsel noch nicht.

Was ist bei den Älteren anders? Hat sich in ihrem Gehirn etwas verändert? Um dies herauszufinden, messen die Forschenden unter anderem die Hirnaktivität ihrer Probanden, während diese Zeichentrickfilme anschauen. Dazu nutzen sie Elektroenzephalografie (EEG), eine Methode, die elektrische Aktivitäten des Gehirns anhand der Spannungsschwankungen an der Kopfoberfläche misst. „Die Kleinen sitzen dabei meist auf dem Schoß der Mutter, und wir lenken sie kurz ab, um ihnen die Kappe

das nun zwei wichtige Hirnareale miteinander verbindet. Das eine liegt im hinteren Schläfenlappen und hilft uns, über andere nachzudenken. Das andere sitzt im Frontallappen der Großhirnrinde und ist vermutlich dafür zuständig, die verschiedenen Ebenen voneinander zu unterscheiden und so die eigene und die fremde Perspektive auseinanderzuhalten.“ Erst wenn diese „Datenautobahn“ vorhanden ist, gelingt es Kindern, sich in andere hineinzuversetzen. Die Verbindung entwickelt sich etwa zeitgleich mit der Fähigkeit, Vermutungen über die Gedanken anderer auch auszusprechen. „Interessanterweise unterstützt die neue Nervenverbindung diese Fähigkeit ganz unabhängig davon, wie gut andere geistige Fähigkeiten – Intelligenz, Sprachverständnis oder Impulskontrolle – ausgeprägt sind“, betont Grosse Wiesmann. Sie vermutet, dass ein stark ausgeprägter Fasciculus arcuatus der Grund dafür ist, dass manche Menschen besonders gut darin sind, sich in andere hineinzuver-

Charlotte Grosse Wiesmann forschte in der Teilchenphysik, bevor sie den Weg fand zu ihrem heutigen Thema, dem Gehirn.

46

mit den EEG-Elektroden aufzusetzen“, erzählt Grosse Wiesmann. Zusätzlich wird oft noch eine Magnetresonanztomografie (MRT) gemacht, die die Strukturen des reifenden jungen Gehirns millimetergenau sichtbar macht. Aber wie bekommt man denn Kinder in die enge Röhre? „Platzangst kennen sie noch nicht. Bei den Eineinhalbjährigen nutzen wir in der Regel den natürlichen Mittagsschlaf. Die Eltern kommen dann um die typische Mittags-schlafzeit, machen die üblichen Schlafroutinen – etwas vorlesen oder singen –, und wenn das Kind schläft, legen sie es auf die MRT-Liege.“ Für Fünfjährige wird das MRT zum Raumschiff erklärt, in dem man einen Film sehen kann. „Sind Kopfhörer und Videobrille erst mal auf, vergessen sie die Umgebung schnell“, sagt die Forscherin. Während Mickey Mouse oder das freche Eichhörnchen Scrat aus *Ice Age* Abenteuer bestehen, schauen die Forschenden auf den Monitor, auf dem scheinbar die Gehirnstrukturen des Kindes erscheinen. „Ab einem Alter von etwa vier Jahren finden wir eine stärkere Verbindung über ein bogenförmiges Nervenfaserbündel – den Fasciculus arcuatus –,

setzen. „Dass dies Menschenaffen nicht so gut gelingt, könnte umgekehrt an einer nur schwächeren Verbindung liegen.“

Das menschliche Gehirn ist ein kleines Universum für sich. Den Weg dahin fand Charlotte Grosse Wiesmann erst, nachdem sie in einer vollkommen anderen Welt geforscht hatte – in jener der Quantenphysik. Daran, dass sie schon sehr früh ein Faible für Physik entwickelte, ist ihr Vater, selbst Physiker, nicht unschuldig. Von einer Reise in die USA hatte er ein Teleskop mitgebracht, durch das sie abends gemeinsam die Sterne betrachteten. Es folgten Physikprojekte in der Schule und die Teilnahme an „Jugend forscht“. Dafür verfolgte sie genauestens die Bahnen der Jupitermonde und prüfte anhand der Daten die Kepler'schen Gesetze über den Umlauf von kleineren Himmelskörpern um ein Zentralgestirn. Gravitation, Elementarteilchenphysik – mit grundlegenden Fragen der theoretischen Physik wollte sie sich befassen und schrieb sich an der Universität Hamburg für Physik ein – und für Philosophie. „In der Schule war ich immer

—>

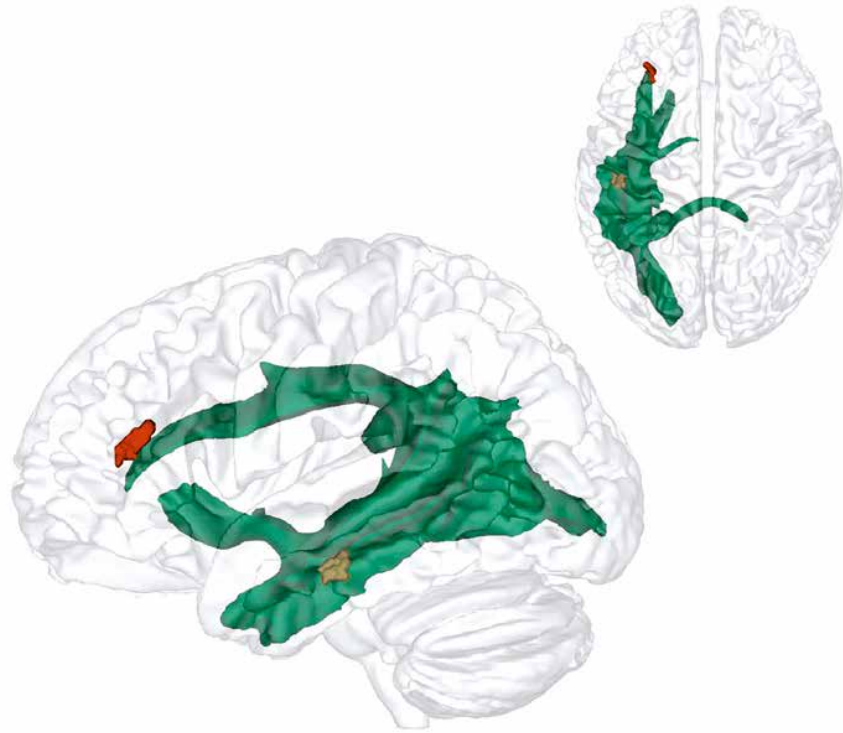
FOTO: MPI FÜR KOGNITIONS- UND NEUROWISSENSCHAFTEN



47

Handpuppen als Laborausstattung: Charlotte Grosse Wiesmann wendet spielerische Methoden an, um herauszufinden, wie die Fähigkeit, sich in andere hineinzusetzen, und die Sprachentwicklung zusammenhängen.

Wichtige Verbindung: Der Fasciculus arcuatus (grün) verknüpft ab etwa dem vierten Lebensjahr zwei Hirnareale: eine Region im hinteren Schläfenlappen (braun), die uns als Erwachsenen hilft, über die Gedanken anderer nachzudenken, und ein Areal im vorderen Großhirn (rot), das vermutlich dazu dient, eigene und fremde Perspektiven auseinanderzuhalten.



GRAFIK: MPI FÜR KOGNITIONS- UND NEUROWISSENSCHAFTEN

48

hin- und hergerissen gewesen zwischen geisteswissenschaftlichen und konzeptionellen Fragen in den Naturwissenschaften. Und ich dachte, mit dieser Fächerkombination den Dreh gefunden zu haben, beides zu verbinden“, erzählt sie. Als sie für das Hauptstudium an die Humboldt-Universität nach Berlin wechselte, zeigte sich, dass ein Doppelstudium unmöglich war. Die Physikvorlesungen liefen am Stadtrand in Adlershof – Philosophieseminare fast zeitgleich in Berlin-Mitte.

Dann eben Konzentration auf die theoretische Physik. Darauf, wie die Gravitationstheorie mit der Elementarteilchenphysik zusammenpasst. Die Studienstiftung ermöglichte ihr ein Auslandsjahr in Paris, an der renommierten Ecole Normale Supérieure. Doch konzeptionell zu arbeiten, die großen Zusammenhänge zu finden, wie Charlotte Grosse Wiesmann sich das vorgestellt hatte, war nicht so einfach. Die Doktorarbeit in mathematischer Physik brach sie nach einem halben Jahr frustriert ab. „Ich war im Wesentlichen dabei, Integrale auszurechnen. Das war alles sehr technisch, und es schien unendlich lange zu dauern, bis man all die Theorien erfasst haben würde und selbst schöpferisch tätig werden konnte.“

Aber es gab ja noch so viele andere spannende Dinge. Wie funktioniert der Mensch? Wie sein Denken? Die Philosophie des Geistes. Hirnforschung! Nach

einer kurzen Auszeit sah sie sich nach Arbeitsgruppen um, die sich mit diesen Themen befassten, und stieß auf die Neuropsychologin Angela Friederici, Direktorin am Leipziger Max-Planck-Institut. „Ich kontaktierte sie und fragte: Wie wirkt sich Sprache auf das Denken aus? So kamen wir ins Gespräch und hatten bald ein Projekt für meine Doktorarbeit gefunden.“

Auf Fachkonferenzen traf sie wiederholt Victoria Southgate vom Center of Early Childhood Cognition der Universität Kopenhagen. „Ihre Theorieentwicklung war nah an dem, wie ich mir die Dinge vorstellte. Als Postdoc zu ihr zu gehen, schien mir logisch zu sein.“ Die Psychologin bot ihr eine Stelle an, doch Charlotte Grosse Wiesmann wollte ein eigenes Forschungsprojekt umsetzen und bewarb sich erfolgreich um ein Marie-Curie-Stipendium bei der EU. Für das Jahr in Kopenhagen verschob sie sogar die Gründung ihrer Minerva-Arbeitsgruppe, für die Angela Friederici sie bereits vorgeschlagen hatte.

Kopenhagen! Ein kostspieliges Pflaster, auf dem bezahlbarer Wohnraum Mangelware ist. Schließlich kam sie in einer WG unter. Ihr eigenes Reich umfasste ganze acht Quadratmeter. Doch die spannende Forschung und die beruflichen Möglichkeiten waren es ihr wert, sich einzuschränken. Was Charlotte Grosse Wiesmann nicht ahnte: Kopenha-

gen sollte auch privat ihr Leben verändern. Die junge Frau wohnte erst wenige Wochen in der Stadt, als sie einmal auf dem Weg zum Flughafen strandete: „Wir mussten aussteigen, und alle drängten sich um einen Metro-Angestellten, um Informationen zu erhalten. Ich verstand kein Wort, da ich noch kein Dänisch sprach“, erzählt sie. Das blieb nicht unbemerkt. Ein Däne, auf dem Weg in die USA, trat heran und übersetzte für sie. Gemeinsam suchten sie im Internet nach Wegen, um den Airport schnellstmöglich zu erreichen, denn Charlotte Grosse Wiesmann war spät dran. Die beiden verstanden sich gut und ihr Helfer, ein Historiker, der sich auf die Restaurierung und den Bau von Möbeln verlegt hatte, schlug vor, sich nach seiner Rückkehr zu treffen. „Er wollte mir Kopenhagen zeigen – auf einer Tour zu den besten Bäckereien der Stadt“, erzählt sie lächelnd. Zimtschnecken und Wienerbrød, ein fluffiger Blätterteig, gefüllt mit Vanillecreme und/oder allerlei Fruchtigem. Mmmmh, einfach unwiderstehlich! Der Rest ist Geschichte: Sie zogen noch in Kopenhagen zusammen. Einen Großteil der Möbel in der Berliner Wohnung hat inzwischen jener Däne gebaut, und im Oktober kommt ihr erstes gemeinsames Kind zur Welt. Ein Mädchen.

nerva-Förderung, auf drei Jahre begrenzt. Sie selbst kann sich danach auf eine reguläre Nachwuchsgruppenleiterstelle bewerben – in der Max-Planck-Gesellschaft, aber auch anderswo. Langfristig strebt Charlotte Grosse Wiesmann eine Professur an, gern im Bereich der Gehirnentwicklung von Kleinkindern. „Es wäre natürlich auch interessant, die Erwachsenenforschung dazu zu sehen. Oder die bei Menschenaffen. Aber an der Kernfrage – wie entwickelt sich das menschliche Gehirn? – werde ich dranbleiben“, sagt sie.

Die Forschung nimmt sie derzeit voll in Anspruch, deshalb wird ihr Mann den größten Teil der Elternzeit nehmen. Auch wenn sie wissenschaftlich völlig unabhängig arbeitet, schätzt sie es sehr, dass ihr während der „Minerva-Zeit“ Angela Friederici zur Seite steht. „Es ist toll, sie als Mentorin zu haben, denn bei vielen Dingen muss ich noch herausfinden, wie der Hase in der Forschung so läuft.“ Nur eines vermisst sie: die Zeit, sich politisch und gesellschaftlich zu engagieren. So wie früher im Alumniprogramm „Netzwerk Europa“. Eine der Projektreisen führte sie zehn Jahre nach dem Jugoslawienkrieg nach Bosnien-Herzegowina, wo sie sich ein Bild

Was sie vermisst: die Zeit, sich politisch und gesellschaftlich zu engagieren, Geflüchtete zu unterstützen oder Podiumsdiskussionen zu organisieren.

In zwei Jahren wird sie dann also selbst eine kleine „Probandin“ zu Hause haben. Wie praktisch. Wird sie das nutzen? „Bestimmt!“, sagt sie lachend. „Es ist eine gute Möglichkeit, neue Verhaltenstests auszuprobieren.“ Bis es so weit ist, wird sie sich um das Fortkommen ihrer wissenschaftlichen Karriere kümmern. Aktuell macht sie sich allerdings mehr Gedanken um die Forschung ihrer Mitarbeitenden, denn ihre vier Promovierenden konnten wegen Corona in den vergangenen eineinhalb Jahren kaum Daten sammeln. „Sie stehen enorm unter Druck. Die Hälfte ihrer Zeit ist bereits rum, und eine Verlängerung kann ich ihnen leider nicht anbieten.“ Die Mitarbeitendenstellen sind, ebenso wie die Mi-

davon machen konnte, wie kulturelle Initiativen helfen, Konflikte zwischen den einstigen Bürgerkriegsparteien zu überwinden. „Wir haben Einwegkameras an die verschiedenen ethnischen Gruppen verteilt, sie gebeten, Fotos von ihrem Alltag zu machen, und danach eine Ausstellung organisiert.“ Später gab Charlotte Grosse Wiesmann syrischen Geflüchteten ehrenamtlich Nachhilfe und organisierte Podiumsdiskussionen zu Migrationsthemen. Aktuell hat sie maximal noch Kapazitäten für ihre Querflöte oder eine Laufrunde. Wegen der Schwangerschaft ist sie nun zum Nordic Walking übergegangen. Doch das wird sich bald wieder ändern. Wie vermutlich so manches andere auch.

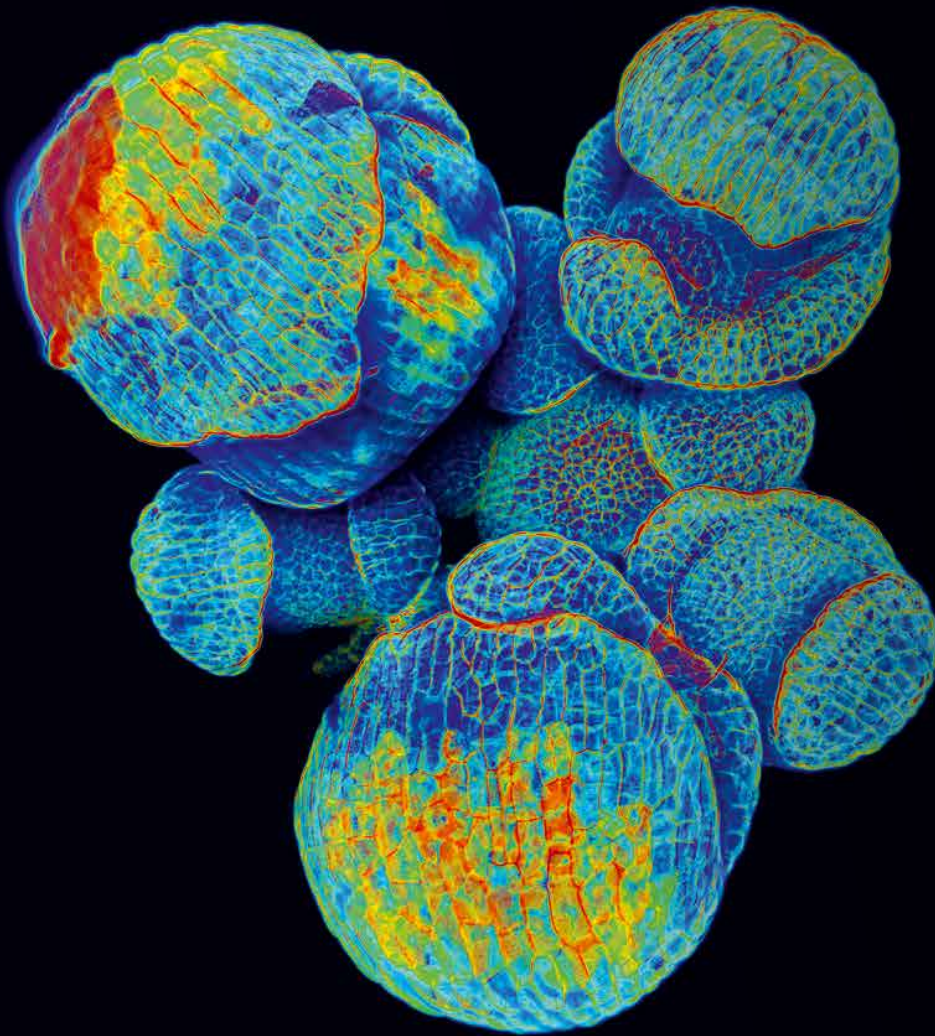




FOTO: MPI FÜR MOLEKULARE PFLANZENPHYSIOLOGIE / SEVENS(+)|MALTRY

ZWEITER BLICK

MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR MOLEKULARE PFLANZENPHYSIOLOGIE



Nur wenn das Timing stimmt und eine Pflanze zur richtigen Zeit blüht, kann sie erfolgreich Samen bilden und ihren Fortbestand sichern. Die Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*), die häufig auf Äckern und an Wegrändern wächst, öffnet ihre unscheinbaren weißen Blüten im Frühjahr (linkes Bild). Um den idealen Zeitpunkt abzugreifen, misst die Pflanze über spezielle Sensoren in den Blättern die Tageslänge. Ist die Lichtperiode lang genug, wandern Botenstoffe aus den Blättern in die Sprossspitzen und leiten das Signal zum Blühen dorthin weiter. Sobald die molekulare Botschaft angekommen ist, beginnen sich aus dem kuppelförmigen Gewebe der Sprossspitzen – dem sogenannten Sprossspitzenmeristem, in dem die pflanzlichen Stammzellen sitzen – die Blüten zu entwickeln (rechts).

51

TRÖPFCHEN IN DER ZELLSUPPE

TEXT: TIM SCHRÖDER

52

Jahrzehntlang interessierte sich niemand für die Bläschen, die Biologinnen und Biologen bei der Beobachtung von Zellen unter dem Mikroskop beobachteten. Cliff Brangwynne und Anthony Hyman vom Dresdner Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik gehören zu den ersten Forschern, die diese rätselhaften Phänomene näher untersuchten.

Der Aufbau von Zellen ist heute Schulstoff. Sie werden meist als kleine Blasen oder Vierecke dargestellt, in denen ein Zellkern und mehrere Organellen herumschwimmen: der sogenannte Golgi-Apparat, in dem Proteine verändert werden, oder die Mitochondrien, die Kraftwerke der Zelle. Viel mehr, so suggerieren diese Schulbuchzeichnungen, ist in einer Zelle nicht enthalten.

Tatsächlich aber sind die Zellen randvoll gefüllt. Man schätzt, dass das Innere einer jeden Zelle rund fünf Milliarden Proteinmoleküle enthält. Und die schwimmen nicht einfach nur herum. Vielmehr fügen sie sich auf faszinie-

rende Weise zu Bläschen zusammen, die hier und da auftauchen und miteinander verschmelzen. Manchmal entstehen innerhalb von Minuten Dutzende solcher Körperchen, die dann ebenso schnell wieder verschwinden. Seit es Mikroskope gibt, kennen Forschende die Bläschen, die als undefinierte kleine Kleckse zu sehen waren. Doch hatte sich lange Zeit niemand wirklich dafür interessiert. Bis der Zellbiologe Anthony Hyman und sein damaliger Mitarbeiter Cliff Brangwynne im Jahr 2008 in einem Physiologiekursus eine erstaunliche Entdeckung machten. Die Gruppe betrachtete gerade Eier des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans* unter dem Mikroskop. Cliff Brangwynne bemerkte in den Zellen einige auffällig große Körper, die sich wie Öltröpfen im Wasser verhielten. Das Interesse der Forscher war geweckt!

Seitdem hat Forschende weltweit die Faszination für Bläschen gepackt. Heute weiß man, dass es sich bei diesen Körpern um Ansammlungen von Proteinen und anderen großen Molekülen wie Nukleinsäuren handelt. Sie

bilden sich nicht zufällig, sondern ihr Wachsen und ihr Vergehen werden von den Zellen aktiv gesteuert. Anthony Hyman, Direktor am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik in Dresden, nennt diese Eiweißstrukturen „Kondensate“. Sie entstehen, wenn sich Proteine in der Zellflüssigkeit zusammenfinden und eine dichtere Masse bilden, also in eine neue „Phase“ übergehen.

Viele Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gehen nun davon aus, dass diese Proteinkondensate eine wichtige Rolle bei biochemischen Prozessen in den Zellen spielen, sei es bei der Zellteilung, beim Ablesen des genetischen Codes und der Herstellung von Proteinen oder auch bei der Entstehung von Krankheiten. „In den meisten Fällen wissen wir noch immer nicht genau, was die Bildung der Kondensate antreibt und welche Funktion die verschiedenen Körperchen besitzen“, sagt Hyman. Zum Vergleich: Ersetzte man die fünf Milliarden Proteinmoleküle durch Menschen und behielte die Dichte bei, so fänden alle



WISSEN AUS

— BIOLOGIE & MEDIZIN

Ein fluoreszierendes, zuckerspaltendes Enzym färbt Endothelzellen violett. Leiden die Zellen unter Sauerstoffmangel, lagern sich bestimmte Proteine zusammen (grüne Punkte). In den weißen Flecken kommen diese Proteine und das zuckerspaltende Enzym zusammen.



Menschen auf der Fläche des Comer Sees Platz. Das Faszinierende daran: Die Proteine können sich innerhalb weniger Sekunden neu anordnen und dabei auch Kondensate bilden.

Schreckliche Aggregate

Zusammen mit seinem Team untersucht Anthony Hyman, wann und wie die Proteine in den Zellen zueinanderfinden – beispielsweise bei welchen Temperaturen oder Salzgehalten sich die Proteinkondensate bilden. Dieses Wissen ist wichtig, weil viele Krankheiten wahrscheinlich dann entstehen, wenn der natürliche Rhythmus aus Bildung und Auflösung der Kondensate aus dem Takt gerät. Ein Beispiel ist ein Protein namens Tau. In den Zellen reguliert es den Zusam-

menbau der sogenannten Mikrotubuli – langer, fadenförmiger Moleküle, die Teil des Zellskeletts sind. Nimmt das Tau-Protein eine falsche dreidimensionale Struktur an, bildet es die für die Alzheimer-Krankheit typischen Ablagerungen. Die amyotrophe Lateralsklerose (ALS) ist ein weiteres Beispiel. Dabei handelt es sich um eine Erkrankung, bei der Nervenzellen absterben, welche die Muskeln steuern. Versagen diese Zellen ihren Dienst, kann der Körper ansonsten intakte Muskeln nicht mehr bewegen. Hyman und seine Mitarbeitenden haben das Protein „Fused in sarcoma“ (FUS) untersucht, dessen mutierte Formen mit ALS in Verbindung gebracht werden. Normalerweise befindet sich das FUS-Protein im Zellkern. Aber in Zellen, die Umweltstress ausgesetzt sind, verlässt es den Kern und formt Tröpfchen in der Zellflüssigkeit. Als Hymans Gruppe im Labor

Tröpfchen mit FUS-Proteinen herstellte, die in ähnlicher Weise wie bei ALS mutiert waren, machten sie eine beunruhigende Entdeckung: Nach wenigen Stunden waren die Tröpfchen zu „schrecklichen Aggregaten“ erstarrt, wie Hyman es formuliert. Die mutierten Proteine trieben offensichtlich einen Phasenübergang von einem flüssigen in einen festen, kristallähnlichen Zustand an, der auch die Krankheit verursachen könnte.

Phänomene wie die Phasenübergänge von fest zu flüssig und die Bildung von Kondensaten sind heute prinzipiell gut verstanden. Physiker haben solche Phänomene genauer erforscht und beschrieben. Die Konzentration von Stoffen, die Ladung von Proteinen oder die Tatsache, dass bestimmte Proteinabschnitte eher waseranziehend oder eher -abweisend

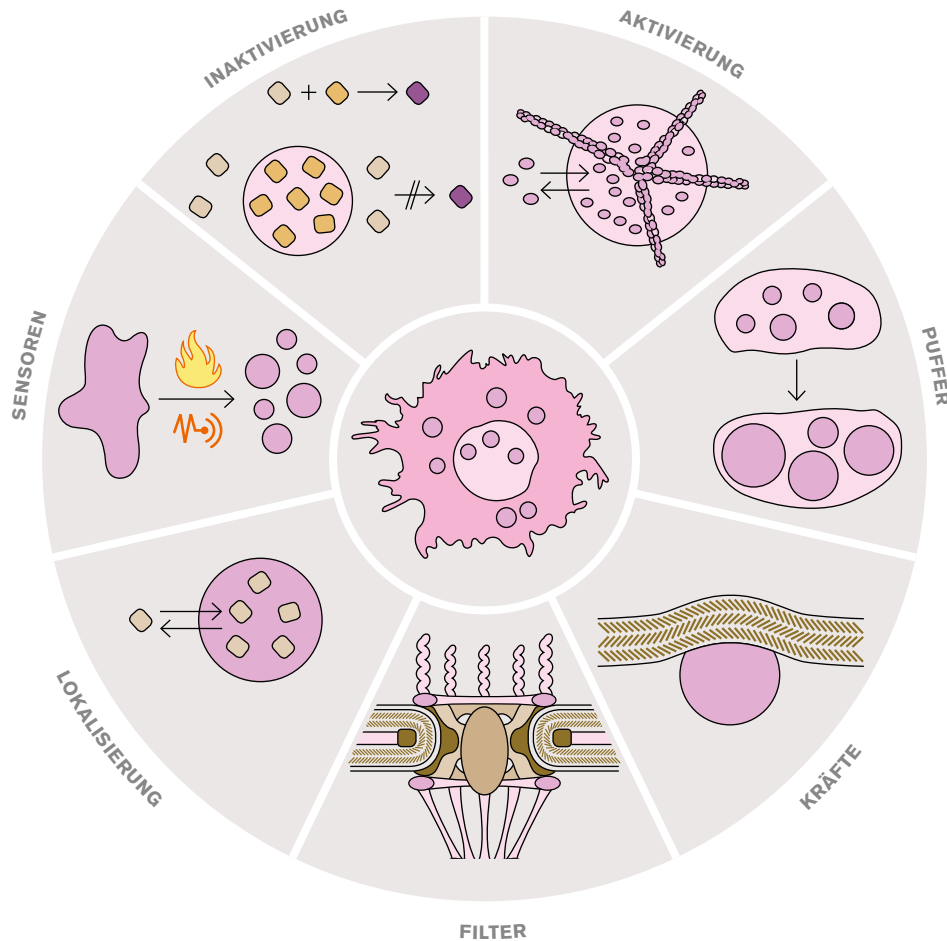
54

Hari Raj Singh (links) und Sina Wittmann im Labor am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik. Zusammen mit ihren Kolleginnen und Kollegen wollen sie herausfinden, wie sich Biokondensate in Zellen bilden und welche Funktion sie haben.



FOTO: MPI FÜR MOLEKULARE ZELLBIOLOGIE UND GENETIK

GRAFIK: GCO NACH CELL, 2019 JAN 24; 176(3)



Noch sind die Aufgaben von Kondensaten in Zellen nicht alle bekannt. Diskutiert werden (von oben im Uhrzeigersinn): die Aktivierung von Reaktionen; die Speicherung überschüssiger Moleküle (Puffer); die Erzeugung mechanischer Kräfte; die Veränderung der Größe von Membranporen (Filter) sowie die Lokalisierung von Molekülen an einem Ort. Wenn die Kondensate nur unter bestimmten Bedingungen entstehen, könnten sie auch als Sensoren dienen. Zudem könnten sie Reaktionen zwischen Molekülen verhindern, indem sie diese getrennt halten (Inaktivierung).

55

sind, spielen hier eine Rolle. Doch wie der Prozess der Phasentrennung und Kondensation in den Zellen gestartet und gestoppt und wie er gesteuert wird, ist immer noch unbekannt. Grundsätzlich gilt, dass die Konzentration der Proteine in den Zellen hoch sein muss, damit sich Kondensate bilden können. Anthony Hyman fragte sich deshalb nicht nur, warum sich die Bläschen bei bestimmten Krankheiten bilden, sondern auch, wie in gesunden Zellen die Zusammenlagerung gestartet oder gehemmt wird. „Warum ist die Zelle kein Rührrei, in dem die Proteine miteinander verklumpt sind? Schließlich sind die Proteine in der Zellflüssigkeit so hoch konzentriert, dass sie eigentlich aus der Lösung ausfallen müssten.“

Möglicherweise hat Anthony Hyman nun ein Schlüsselmolekül gefunden: Adenosintriphosphat (ATP). ATP ist das Molekül, das lebenden Zellen fast

die gesamte Energie liefert. Hyman wurde hellhörig, als seine Mitarbeitenden ATP zu Proteinkondensaten gaben und feststellten, dass die Kondensate verschwanden. Offenbar verhindert ATP eine Zusammenlagerung der Proteine auch bei den hohen Konzentrationen in einer Zelle.

Bessere Löslichkeit in Wasser

ATP scheint wie sogenannte hydrotrope Stoffe zu wirken. Diese Substanzen sind selbst keine Lösungsmittel, werden aber in der chemischen Industrie eingesetzt, um die Löslichkeit organischer Verbindungen in Wasser zu erhöhen. ATP ist ein Molekül, das in Zellen in großen Mengen vorkommt. Denkbar ist, dass ATP nur in bestimmten Konzentrationen hydrotrop wirkt. Eine Veränderung der

Konzentration würde also die Löslichkeit der Proteinkondensate beeinflussen. „Möglicherweise hat sich ATP ursprünglich als biologisches Hydrotrop entwickelt, um Biomoleküle in hoher Konzentration löslich zu halten. Erst später nutzte das Leben es als Energiequelle“, erklärt Hyman. Diese Hypothese ist jedoch experimentell nur schwer zu beweisen. Denn die hydrotropen Eigenschaften von ATP lassen sich kaum verändern, ohne dass zugleich seine Funktion als Energiespender beeinflusst wird. „Aber wenn es stimmt, dann wäre es eine Erklärung dafür, warum sich bei Alterserkrankungen häufig Proteinaggregate bilden, denn mit dem Alter lässt die ATP-Produktion nach.“

Auch während der Zellteilung könnten Proteinkondensate wichtig sein. Bevor sich eine Zelle teilt, ordnen sich die Chromosomen in der Mitte der



Zelle an. Innerhalb weniger Minuten bildet sich die sogenannte Spindel aus, eine Zugseilen ähnelnde Struktur. Mit dieser zellulären Takelage werden die Chromosomen in die beiden Tochterzellen hineingezogen. Auch die Spindel bildet sich durch die Kondensation von Proteinen. Sie entsteht, indem sich in der Zellflüssigkeit einzelne Tubulinmoleküle aneinanderlagern und lange Ketten bilden – die Mikrotubuli. Doch wie läuft die Bildung dieser Mikrotubuli ab? In einem Experiment haben Hyman und sein Team Kondensate des Mikrotubuli bindenden Tau-Proteins erzeugt und

Tubulin hinzugefügt, das in die Tau-Tröpfchen wanderte. Da das Tubulin nun in den Tau-Tropfen wesentlich stärker konzentriert war, löste es die Bildung von Mikrotubuli aus. Hyman und seine Kolleginnen und Kollegen vermuten daher, dass Zellen mittels der Phasentrennung das Wachstum der Mikrotubuli und die Zellteilung initiieren.

Wie groß die Bedeutung der Kondensate letztlich ist, kann Hyman derzeit noch nicht sagen. Früher hat man die Kondensate lediglich als Kleckse betrachtet, heute weiß man jedoch, dass

es sich um Strukturen handelt, die sich nach bestimmten molekularen Regeln bilden – und diese Regeln verstehen die Experten immer besser. „Mittlerweile deutet sehr vieles darauf hin, dass es sich hier tatsächlich um biochemische Mikrofabriken handelt.“ Trotz dieser Erkenntnisse halten manche die Kondensate für wenig relevant. Andere Forschende betrachten sie als eine der wichtigsten Entdeckungen der modernen Biologie. „Was stimmt oder ob die Wahrheit vielleicht in der Mitte liegt, das müssen wir erst noch herausfinden“, sagt Anthony Hyman.

←

Anthony Hyman gilt als einer der Entdecker der Phasenseparierung in Zellen. Bei der Untersuchung von Eiern des Fadenwurms *C. elegans* kam ihm die Idee, dass sich die in den Zellen befindlichen Ansammlungen von RNA-Molekülen wie Öltropfen in Wasser verhalten.



FOTO: SVEN DÖRING

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

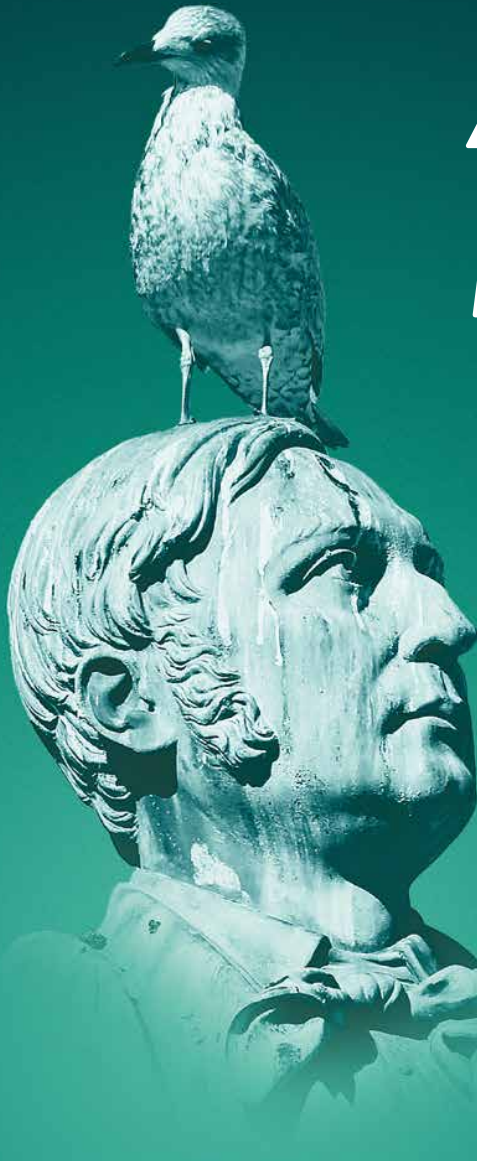
Proteine können in einer Zelle bläschenförmige Ansammlungen bilden. Diese Kondensate können innerhalb von Sekunden oder Minuten entstehen und sich wieder auflösen.

Kondensate spielen wahrscheinlich bei fundamentalen Vorgängen wie der Zellteilung und der Proteinproduktion eine Rolle.

Erkrankungen wie Parkinson oder Alzheimer entstehen vermutlich dadurch, dass sich in den Zellen unkontrolliert Proteinkondensate bilden.



ACH, MENSCH



WARUM SCHEITERN EHEN?
WIE BEEINFLUSST DIE
UMWELT UNSER GEHIRN?
WIE TREFFEN WIR BESSERE
ENTSCHEIDUNGEN?
WIE FUNKTIONIERT
MULTIKULTI? WARUM SPRECHEN WIR,
WIE WIR SPRECHEN?
WAS BEDEUTET
WOHNUNGSLOSIGKEIT?
WARUM IST ABNEHMEN
SO SCHWER?

Geistes- und
Sozialwissen-
schaftler:innen
im Gespräch

Die neue Podcastserie von detektor.fm
und der Max-Planck-Gesellschaft

Jetzt auf allen Plattformen!





Ungezählte Köpfe: Statistiken zur Bevölkerungsentwicklung hinken der Realität oft hinterher. Eine schnelle Möglichkeit, Veränderungen zu erfassen, bieten Handydaten – zum Beispiel aus sozialen Netzwerken.

VOLKSZÄHLUNG PER FACEBOOK

TEXT: JAN SCHWENKENBECHER

Mehr als ein Drittel der Weltbevölkerung nutzt Facebook mindestens einmal im Monat. Dabei sammelt das soziale Netzwerk viele Daten von den Nutzerinnen und Nutzern – eine wertvolle, aber kaum erschlossene Quelle für die Wissenschaft. Emilio Zagheni und sein Team am Max-Planck-Institut für demografische Forschung in Rostock nutzen die Daten zum Beispiel, um Migrationsströme nachzuvollziehen und Trends zu erkennen.

Drei Tage lang hatten die Behörden den Vorboten eines Wirbelsturms schon beobachtet, der sich da durch den Atlantik immer weiter gen Westen schob, wuchs und wuchs und am Abend des 16. September 2017 so groß geworden war, dass die Meteorologen ihn zum Hurrikan erklärten und ihm einen Namen gaben: Maria. Und Maria wuchs weiter, Tag um Tag. Die maximale Intensität erreichte der Wirbelsturm drei Tage später, um drei Uhr in der Nacht. 280 Stundenkilometer Windgeschwindigkeit und ein extrem niedriger Luftdruck von 908 Millibar. Der zehntstärkste je aufgezeichnete

tropische Hurrikan. Einige Stunden später traf Maria auf die Küste Puerto Ricos. Der Wirbelsturm entwurzelte Bäume, riss Dächer von Häusern, wirbelte Autos durch die Luft. Die Strom- und die Trinkwasserversorgung brachen zusammen. Nur elf von 69 Krankenhäusern konnten den Betrieb aufrechterhalten. Maria wurde zu einer der tödlichsten Naturkatastrophen in der Geschichte der Vereinigten Staaten: Die Behörden sprachen zunächst von 45 Todesopfern, korrigierten die Zahl jedoch immer wieder – etwa ein Jahr später wurde sie mit 2975 angegeben. Tausende Puerto Ricaner verließen den Inselstaat, ein Außengebiet der USA, und suchten Zuflucht auf dem US-amerikanischen Festland. Wie viele genau, das wusste monatelang niemand so recht. Erst über ein Jahr später veröffentlichte das United States Census Bureau seine routinemäßig erhobenen Migrationsdaten.

Einer, der die Zahlen schon früher kannte, dazu mit zusätzlichen Details, ist Emilio Zagheni, der Daten aus allen verfügbaren Quellen zusammengetragen hatte. „Die Angaben der Behörden sind gut, sie sind sehr genau. Aber es sind jährliche Einmalaufnahmen, und im Zeitraum zwischen zwei Bildern kann viel passieren“, erklärt Zagheni. „Was die Menschen dazwischen gemacht haben – diese Informationen gehen verloren. Manche Puerto Ricaner kamen nur kurz aufs Festland der USA und kehrten nach einigen Wochen oder Monaten wieder zurück. Andere sind innerhalb des Landes weitergereist.“ Zagheni ist Direktor am Max-Planck-Institut für demografische Forschung. Er hat Statistik und Demografie studiert, in seiner Forschung versucht er nun beides zu kombinieren. Der Arbeitsbereich, den er leitet, heißt „Digitale und computergestützte Demografie“.

Was er da tut? Demografische Fragen mit digitalen Daten beantworten. Welche digitalen Daten das sind? Alle, die Zagheni bekommen kann – hauptsächlich allerdings solche aus sozialen Netzwerken wie Facebook, Instagram, Twitter oder auch LinkedIn. Wie genau das funktioniert, zeigt das Beispiel Maria.

Bessere Daten, gezieltere Hilfe

Bereits im Januar 2017, neuneneinhalb Monate vor Maria, hatte Emilio Zagheni mit ein paar Kollegen begonnen, aggregierte und anonyme Facebook-Daten aus den USA zu sammeln. Alle paar Monate machte er eine Art Schnappschuss. Daraus konnte er ablesen, wie viele User in jedem der 50 Bundesstaaten aktiv waren und welches Alter und welches Geschlecht sie hatten. Außerdem konnte Zagheni dort sehen, aus welchen Regionen außerhalb des US-Festlands die Menschen stammten. Zu diesen Regionen gehört auch Puerto Rico. In ihren Daten sahen Zagheni und seine Kollegen, dass auf dem US-amerikanischen Festland die Zahl der Puerto Ricaner in den Wochen nach Maria um 17 Prozent anstieg. Das entspricht etwa 185 200 Personen und damit 5,6 Prozent der Gesamtbevölkerung Puerto Ricos.

Die meisten dieser Personen flüchteten nach Florida. Das liegt nahe, wortwörtlich. Aber auch in die entfernter gelegenen Bundesstaaten Pennsylvania, New York, Connecticut oder Massachusetts kamen zwischen 8000 und 15 000 Menschen aus Puerto Rico, die meisten von ihnen waren junge Männer. Wichtige Informationen, denn: „Um den Menschen helfen zu können, muss man Migration zunächst verstehen und wissen, wer wohin geht, um was zu tun“, sagt Zagheni. „Und dafür sind Zahlen wie diese wichtig, um zum Beispiel die richtige Menge an Ressourcen und Unterstützung an verschiedene Orte zu schicken.“

Hurrikan Maria ist dabei nur eines von zahlreichen Beispielen, in denen

Zagheni Facebook-Daten nutzt, um damit die Migrationsbewegungen zu erforschen. An die Daten gelangt er über die eigens für Werbekunden geschaffene Ads-Plattform. Dort können Unternehmen, die eine Werbeanzeige schalten möchten, angeben, welche Facebook-User die Werbung angezeigt bekommen sollen. Zum Beispiel: Männer, die in Berlin leben und zwischen 30 und 40 Jahre alt sind. Wie Facebook darauf kommt, dass eine bestimmte Person bestimmte demografische Merkmale und Interessen hat, das verrät das soziale Netzwerk nicht. Dennoch müssen Zagheni und sein Team der Black Box Facebook nicht blind vertrauen. Nach dem

Motto „Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser“ haben sie die Genauigkeit grundlegender demografischer Daten geprüft. In einem jüngst veröffentlichten Working Paper zeigen sie, dass die Facebook-Daten zu Geschlecht, Alter und Wohnort zu 86 bis 93 Prozent stimmen. Nicht nur im Fall von Hurrikan Maria bieten Facebook-Daten einige Vorteile. Zum einen, weil sie viel kleinteiligere Informationen enthalten als die klassischen, behördlichen Datenquellen. Etwa weil sie monats- oder bei Bedarf sogar tageweise abgefragt werden können. Dazu sind sie schneller verfügbar als Behördendaten. Viel schneller. Und ein weiterer Vorteil ist die Vergleich-



FOTO: SHUTTERSTOCK/ALESSANDRO PIETRI

Andauernde Katastrophe: Noch Wochen nach Hurrikan Maria waren in der puerto-ricanischen Hauptstadt San Juan manche Straßen überflutet.

Ausdauernde Menge: Kurz nach der Katastrophe bildeten sich am Flughafen lange Schlangen von Menschen, die teilweise tagelang auf einen Flug warteten.



FOTO: JOE RAEDLE/GETTY IMAGES

barkeit. Denn für klassische Datensets gilt oft: Verschiedene Länder erheben Daten mit unterschiedlichen Definitionen und mit unterschiedlicher Detailliertheit und Genauigkeit.

Frage man etwa in Polen und in Deutschland nach, wie viele Menschen im Jahr 2007 von Polen nach Deutschland ausgewandert sind, dann fallen die Angaben recht verschieden aus, sagt Zagheni. „Die Polen sprechen etwa von 14000, die Deutschen von 150000 Personen.“ Das liege mitunter daran, dass „die deutschen Behörden alle, die aus Polen kommen und sich beim Rathaus melden, als Migranten registrieren. Unabhängig davon, wie lange jemand bleibt“, sagt Zagheni. „Die polnischen Behörden hingegen zählen nur jene Menschen als Migranten, die die Absicht haben, dauerhaft in ein anderes Land zu ziehen.“ In den Facebook-Daten sind alle gleich – und damit auch vergleichbar. Doch gibt es auch einen großen Nachteil: Die Nut-

zer von Facebook sind für die Bevölkerung nicht repräsentativ. Um es kurz zu fassen: Viele über 60-Jährige und sehr viele unter 20-Jährige nutzen Facebook nicht. In anderen sozialen Netzwerken mag das anders aussehen, doch repräsentativ für die Bevölkerung sind sie eigentlich alle nicht. Für die Forschung heißt das: Absolute Aussagen zu treffen, wird schwieriger. Was dennoch gut geht: Trends beobachten und vergleichen. Denn konstante Verzerrungen können die Forscher herausrechnen.

Mobilitätsdaten vom Karriereportal

Die Migration ist aber nicht das einzige Forschungsfeld, für das Zagheni und sein Team auf digitale Daten zurückgreifen. Ein zweiter Bereich ist die Alterung der Bevölkerung. „Wir untersuchen, inwieweit die Technologie für ältere Menschen von Nutzen sein

kann und wie sich der Zugang zur Technologie für verschiedene Gruppen verändert“, sagt Zagheni. Wie hoch ist der Grad der digitalen Kompetenz älterer Menschen, und wie könnte er verbessert werden? Und drittens untersuchen die Forscher die Auswirkungen des technologischen Wandels. Ein Beispiel: „In manchen Ländern haben Männer und Frauen möglicherweise unterschiedlichen Zugang zu digitaler Technologie“, so Zagheni. „Wenn wir diesen Zugang messen – indem wir schauen, wie viele Männer und wie viele Frauen soziale Netzwerke nutzen –, können wir womöglich Rückschlüsse auf den Grad der Selbstbestimmung von Frauen in einem bestimmten Land ziehen.“ Auch muss es nicht immer Facebook sein. Sarah Johnson zum Beispiel, Doktorandin in Zaghenis Forschungsgruppe, arbeitet gerade mit den Daten von LinkedIn. Dort können Nutzer ihre berufliche Expertise angeben, Firmen können rekrutieren. Fürs Anwerben von Mit-



arbeitenden gibt es auf LinkedIn eine spezielle Funktion – und die macht sich Sarah Johnson zunutze, um die Migration hochqualifizierter Fachkräfte zu untersuchen. „Über die Plattform bekommen wir wertvolle aggregierte Informationen über die Nutzer“, sagt Johnson. „Wir können zum Beispiel sehen, wie viele Personen bereit sind, von einem bestimmten Ort an einen anderen Ort zu ziehen.“ Das können LinkedIn-User nämlich in ihrem Profil angeben. Seit Sommer vergangenen Jahres sammelt Johnson in regelmäßigen Zeitabständen aggregierte Nutzerdaten wie diese. Die Auswertung läuft. „Wir wollen verstehen, welche Personen tatsächlich umziehen und was diese Gruppe kennzeichnet“, erläutert Johnson. „So können wir möglicherweise genauer erkennen, unter welchen Bedingungen jemand für einen Beruf wirklich umzieht und wann eher nicht.“

Findet Sarah Johnson Faktoren, die die Migration beeinflussen, so könnten diese in bestehende Migrationsmodelle eingearbeitet werden, um sie genauer zu machen. Dann könnten die Forscher Migrationsbewegungen genauer vorhersagen. Daran arbeitet auch Carolina Coimbra Vieira, eine

weitere Doktorandin in Zaghenis Team. „Oft geht man einfach davon aus, dass Migranten ins Nachbarland ziehen, wenn sie ein Land verlassen“, sagt Coimbra Vieira. „Aber es gibt viel mehr Faktoren, die eine Rolle spielen, als nur die Nähe. Die Sprache zum Beispiel oder auch der Wohlstand im Zielland.“ Sie untersucht einen weiteren möglichen Aspekt: die kulturelle Nähe zweier Länder. Nur: Wie kann man kulturelle Nähe messen? Die Forscherin sagt: „Mit Essen.“

Zuckerrohrschnaps und Käsegebäck

Coimbra Vieira ist Brasilianerin, also testete sie die Idee am Beispiel Brasiliens. Zunächst suchte sie die 20 typischsten brasilianischen Spezialitäten heraus – vom Zuckerrohrschnaps Cachaça über den Bohneneintopf Feijoada und das Grillgericht Churrasco bis zu Pão de queijo, einem Käsegebäck. Dann schaute sie, wie viele Facebook-Nutzer sich in Brasilien und in 29 weiteren Ländern für brasilianisches Essen interessierten. Die Annahme: Je mehr Leute das tun, desto näher sind sich die Kulturen. „Einerseits sahen wir, dass die kulturelle Nähe zu Nachbarstaaten recht hoch ist, zum Beispiel zu Paraguay oder Bolivien“, sagt Coimbra Vieira. „Aber es war nicht nur die geografische Lage, welche die kulturelle Nähe bestimmte. Auch in Portugal oder Angola interessierten sich besonders viele Facebook-Nutzer für brasilianisches Essen.“ Beides Länder, in denen die Menschen Portugiesisch sprechen und die auch historisch eng mit Brasilien verknüpft sind. Aktuell testen Coimbra Vieira und ihre Kollegen das Modell über Brasilien hinaus für insgesamt 16 weitere Länder. Die ersten Ergebnisse sehen gut aus: „Auch da zeigt sich, dass kulturelle Ähnlichkeit oder kulturelle Distanz ein Prädiktor für Migration ist“, sagt Coimbra Vieira.

Bei allen Arbeiten von Emilio Zaghenis Forschungsgruppe ist Datenschutz ein wichtiges Anliegen. „Wir nutzen stark aggregierte Daten. Keine der Gruppen ist kleiner als 1000 Perso-

GRAFIK: GCO NACH M. ALEXANDER, K. POLIMIS, E. ZAGHENI, THE IMPACT OF HURRICANE MARIA ON OUT-MIGRATION FROM PUERTO RICO: EVIDENCE FROM FACEBOOK DATA, POPULATION AND DEVELOPMENT REVIEW 45, 3 (2019); WIKIPEDIA



nen“, sagt Zagheni. „Da ist es nicht möglich, Rückschlüsse auf Einzelpersonen zu ziehen.“ Doch das sei nicht der einzige Aspekt. „Wir müssen auch auf den gruppenbezogenen Datenschutz achten.“ Damit meint der Forscher: Wenn man etwa in den Daten sehe, dass eine bestimmte Gruppe von Menschen von einer Region in eine andere zieht, könne man mit einer Publikation diese Gruppe in Gefahr bringen. Zum Beispiel, wenn es sich um Kriegsflüchtlinge handelt, die von einer Regierung verfolgt werden.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

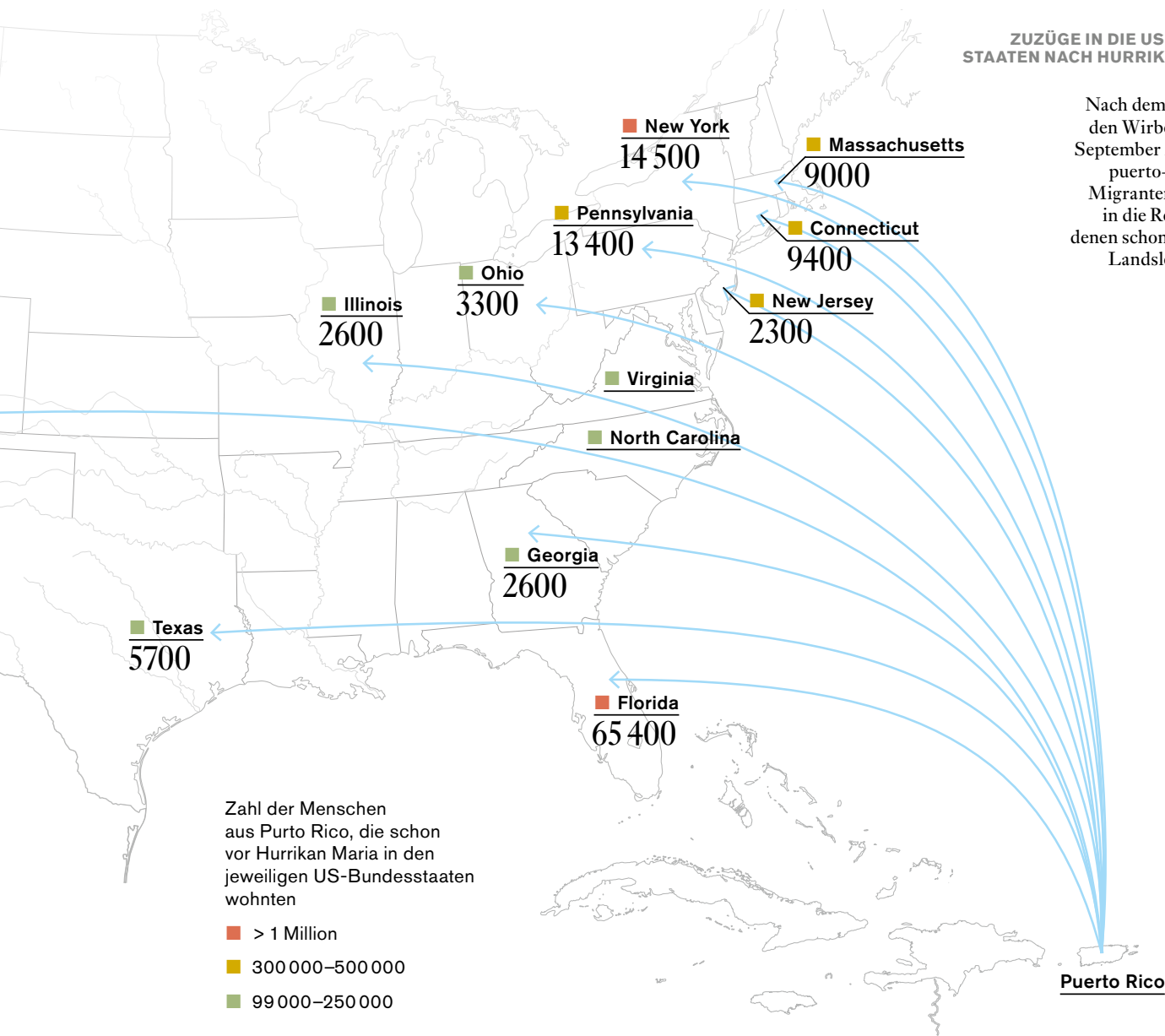
Daten aus sozialen Netzwerken sind schneller verfügbar und detaillierter als Behördendaten, um zu erfassen, wohin sich Menschen zum Beispiel nach einer Katastrophe flüchten.

Diese Daten sind zwar nicht repräsentativ, aber eine gute Quelle für die Beobachtung und die Vorhersage von Migrationstrends.

Die Forschenden achten dabei sorgfältig auf die Sicherheit gefährdeter Personengruppen.

ZUZÜGE IN DIE US-BUNDESSTAATEN NACH HURRIKAN MARIA

Nach dem verheerenden Wirbelsturm im September 2017 zogen puerto-ricanische Migranten vor allem in die Regionen, in denen schon viele ihrer Landsleute lebten.



Ein weiterer Punkt: „Je nach Personen-
gruppe müssen wir das Thema Da-
tenschutz verschieden behandeln. Die
Menschen sind unterschiedlich gut
informiert. Nicht alle sind sich be-
wusst, wie ihre Daten verwendet wer-
den können, und der Grad dieses Be-
wusstseins variiert zwischen den de-
mografischen Gruppen: jung oder alt,
niedrigere oder höhere Bildung,
Migranten oder Einheimische.“ In
manchen Fällen ziehen die Forschenden
eine rote Linie und gehen einer Frage
nicht weiter nach, obwohl es
technisch und rechtlich möglich wäre.

Bei Whatsapp zum Beispiel. Da gibt
es öffentliche Gruppen mit Tausenden
Mitgliedern. Den Chatverlauf
könnte jedes Mitglied problemlos
runterladen und zur Forschung nutzen.
Aber weil die meisten Menschen das gar
nicht wissen, lassen Zagheni
und sein Team es lieber bleiben.

Die Arbeitsgruppe hat ohnehin genü-
gend offene Forschungsfragen, für deren
Beantwortung sie neue Methoden
finden möchte. Zum Beispiel wollen
Zagheni und sein Team zukünftig
mehrere Datenquellen kombinieren,

etwa Facebook-Datensätze mit Tabel-
len des US-amerikanischen
Census-Büros. Oder in Zukunft ei-
gene Daten erheben. Wenn sie von den
30- bis 40-jährigen Berlinern, die sich
für brasilianisches Essen interessieren,
etwa auch noch wissen wollen, welche
Bücher sie lesen und welche Musik sie
hören, könnten die Forschenden tat-
sächlich eine Werbeanzeige für diese
Zielgruppe auf Facebook schalten und
sie zu einer Umfrage einladen. So ent-
stehen auf einmal ganz neue digitale
Datenquellen, die noch detailliertere
Erkenntnisse ermöglichen.



TREIBSTOFF AUS DEM STAHLWERK

TEXT: PETER HERGERSBERG

64

Rund sechs Prozent des weltweiten CO₂-Ausstoßes stammen aus der Stahlindustrie. Um deren Klimabilanz zu verbessern, verfolgt das Carbon2Chem-Projekt einen ungewöhnlichen Ansatz: Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter anderem des Max-Planck-Instituts für chemische Energiekonversion und der Thyssenkrupp AG untersuchen darin, wie sich das Treibhausgas als Rohstoff für Chemieprodukte nutzen lässt, die bislang aus Erdöl erzeugt werden.

Kohlendioxid – für fast alle ist das ein Problem, für manche könnte es aber auch die Lösung sein. Egal, in welche Bereiche der Gesellschaft und der Ökonomie man blickt, die meisten wollen das Zeug irgendwie loswerden, und viele haben noch keinen perfekten Plan, wie. Zum Beispiel die Stahlindustrie. Sie könnte Eisenerz künftig zwar auch mit Wasserstoff oder vielleicht sogar mit Strom statt Kohle in Eisen verwandeln, doch das ist mit vielen Herausforderungen verbunden, wie oft etwas verharmlosend formuliert wird. Und selbst wenn diese ge-

meistert werden, fallen in anderen Schritten der Stahlerzeugung noch erkleckliche Mengen CO₂ an. Noch größer ist die Not bei Müllverbrennungsanlagen oder Zementwerken – sie können ihren CO₂-Ausstoß kaum reduzieren. Damit das Treibhausgas nicht in die Atmosphäre gelangt und den Klimawandel weiter anheizt, haben sie nur zwei Möglichkeiten: abfangen und in unterirdische Speicher pressen oder jemanden finden, der damit etwas anfangen kann. Und tatsächlich gibt es einen möglichen Abnehmer – die Chemieindustrie. Sie könnte CO₂ als Rohmaterial nutzen, um daraus Kunststoffe, Farben oder Treibstoffe zu produzieren. Bislang verwendet sie dafür vor allem Erdöl, das letztlich nicht nur den Klimawandel anheizt, sondern zudem auch nur begrenzt verfügbar ist.

Wie sich CO₂-haltiges Abgas für die Chemieproduktion nutzen lässt – Fachleute sprechen dabei von Carbon Capture and Use, kurz CCU –, das erforschen Wissenschaftlerinnen und

Wissenschaftler im Carbon2Chem-Projekt. Das Anwendungsbeispiel: die Stahlindustrie. Aus diesem Grund ist die Thyssenkrupp AG einer der wesentlichen Partner in diesem Projekt – sie könnte die Technik nicht nur selbst nutzen, sondern auch anderen Stahlproduzenten anbieten. Maßgeblich beteiligt sind außerdem Teams des Max-Planck-Instituts für chemische Energiekonversion in Mülheim und des Oberhausener Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (kurz: Umsicht). Darüber hinaus haben sich auch weitere Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen dem Vorhaben angeschlossen, das vom Bundesforschungsministerium seit 2016 mit gut 140 Millionen Euro gefördert wird. „Mit Carbon2Chem wollen wir zeigen, dass sich CO₂ auch unter den realen Bedingungen der Industrie für die Synthese etwa von Methanol eignet“, erläutert Robert Schlögl, Direktor am Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion und einer der Initiatoren von Carbon2Chem.

→

Rauchende Rohstoffquelle:
Im Duisburger Werk von
Thyssenkrupp erforscht das
Carbon2Chem-Team, wie
sich CO₂ aus der Stahlproduk-
tion sinnvoll nutzen lässt.

FOTO: PICTURE ALLIANCE / JOCHEN TACK



Auf Methanol haben es die Projektpartner abgesehen, weil die Chemie zum einen schon reichlich Erfahrung hat, wie sich dieser Alkohol aus CO_2 herstellen lässt. Zum anderen dient er der Chemieindustrie als Ausgangsmaterial für einige Kunststoffe und andere Erzeugnisse – 70 Millionen Tonnen verbraucht sie davon weltweit pro Jahr. Das ist zwar nicht gerade viel angesichts der gut zwei Milliarden Tonnen CO_2 , die Stahlunternehmen auf der ganzen Welt jährlich ausstoßen und die rund 1,4 Milliarden Tonnen Methanol ergäben. Doch 70 Millionen Tonnen sind ein Anfang, und der Bedarf könnte steigen, nicht nur in der Chemieproduktion. Methanol eignet sich auch als Treibstoff für jene Verkehrssparten, die – wie etwa die Luftfahrt – auf absehbare Zeit noch nicht ohne flüssigen Sprit auskommen. Neben Methanol synthetisieren die Carbon2Chem-Partner aus CO_2 zudem Harnstoff, den die Chemieindustrie ebenfalls im großen Stil benötigt.

hier dem Labor bereits entwachsen. Die Anlage ist in der ersten Phase des Projekts entstanden und erledigt eine wesentliche Aufgabe, wenn es darum geht, Stahlwerke oder andere industrielle CO_2 -Schleudern als Rohstoffquellen für chemische Produkte anzuzapfen: Sie reinigt etwa das Hüttengas, das von der Pipeline abgezweigt wird. Denn aus den Schornsteinen der Eisenverhüttung, aber auch eines Zementwerks oder einer Müllverbrennungsanlage quillt eine wilde Mischung aller möglicher Substanzen, und das auch noch mit schwankenden Anteilen. Für Chemiker, die einen industriellen Prozess möglichst kontrolliert betreiben wollen, ist das ein Albtraum. Immerhin enthält Hüttengas mit CO_2 , Kohlenmonoxid und Wasserstoff auch alle Komponenten des sogenannten Synthesegases, das die chemische Indust-

rie bislang aus Erdgas oder Kohle eigens für die Methanolproduktion erzeugt. Im Hüttengas ist allerdings keine ausreichende Menge Wasserstoff enthalten, er muss zugesprochen werden – woher, ist auch ein Thema für Carbon2Chem.

Nina Kolbe, bei Thyssenkrupp für das Carbon2Chem-Teilprojekt „ CO_2 -Quellen und Infrastruktur“ verantwortlich, zeigt, wo in dem Röhrengeirr einzelne Bestandteile des Gasgemisches entfernt und die Komponenten in ein gewünschtes Mengenverhältnis gebracht werden. Da gibt es etwa Module, die schwefelhaltige Substanzen oder Ammoniak entfernen, und solche, die bei Bedarf auch CO_2 auswaschen. Wie gründlich eine Komponente aus dem Abgas entfernt wird, können die Forschenden steuern. „Wir reinigen das Gas so gut wie

66

Mehr Produktionsstätte als Chemielabor

Da es in dem Projekt darum geht, die Prozesse industrietauglich zu machen, arbeiten einige der Forscherinnen und Forscher in einem sogenannten Technikum auf dem Werksgelände von Thyssenkrupp in Duisburg. Schon auf den ersten Blick sieht hier alles nach Industrie aus. Zwei Pipelines, so dick wie Kanalrohre und von Brückenpfählern getragen, säumen das Gelände. Durch sie strömen die Gase, die bei der Stahlproduktion entstehen, vor allem Hüttengas aus den Hochöfen. Deren Wärme nutzt Thyssenkrupp unter anderem, um daraus Strom zu erzeugen. Schon beim Blick durch das Werkstor zum Carbon2Chem-Areal fällt eine Anlage auf: So hoch wie ein sechsstöckiges Haus türmen sich da, eingefasst in ein knallgelbes Gerüst, Stahlleitungen und -kessel. Das sieht eher nach einer chemischen Produktionsstätte aus als nach chemischer Forschung, die man eher mit Glaskolben und Reagenzgläsern verbindet. Ganz offensichtlich ist die Wissenschaft

Auf der Suche nach Störfaktoren: Im Carbon2Chem-Labor am Fraunhofer-Institut Umsicht analysiert ein Max-Planck-Team unter anderem, welche Bestandteile des Hüttengases die Methanolsynthese beeinträchtigen. Zu diesem Zweck mischen die Forschenden in einer eigens konstruierten Anlage nach Bedarf schmutziges Synthesegas aus verschiedenen Komponenten, die aus Gasflaschen im gelben Schrank (rechts im Bild) zugeführt werden.



nötig und so kostengünstig wie möglich“, sagt Nina Kolbe. Ob das Gas sauber genug ist, überprüfen Mitarbeitende von Holger Ruland, Leiter der Carbon2Chem-Arbeitsgruppe in Robert Schlögl's Abteilung, in einem Labor nebenan. Es ist vollgepackt mit Messinstrumenten und Elektronik, um die Eigenschaften des Gases zu analysieren. Vor allem nutzen die Forschenden hier ein Protonentransfer-Massenspektrometer, das auch knifflige Gasmixturen im laufenden Betrieb analysieren kann und unter einer Million Teilchen einige wenige eines bestimmten Gases aufspürt.

Wie sich die Methanolsynthese mit Hüttengas möglichst effizient fahren lässt und woran es liegt, wenn sie stottert, sind Fragen, denen Ruland's Team ebenfalls nachgeht – am zweiten Standort des Projekts, dem Carbon2-

Chem-Labor am Fraunhofer-Institut Umsicht, etwa eine halbe Stunde Autofahrt vom Duisburger Technikum entfernt. In der Halle, die einem Basketballfeld Platz bieten dürfte, deutet Holger Ruland auf einen Kasten, der einen kleinen Frachtcontainer nicht ganz zur Hälfte ausfüllen würde: „Das ist Schmusy.“ Von der Decke führen fingerdicke Stahlrohre in die maßgefertigte Apparatur, in der zahlreiche Ventile, Leitungen, Regler und elektronische Steuerelemente auszumachen sind. „Damit können wir schmutziges Synthesegas erzeugen – daher der Name Schmusy“, erklärt er. Anders als in Hüttengas oder anderen Abgasen von Industrieanlagen können die Forschenden mit Schmusy die Verunreinigungen genau dosieren und so ermitteln, welche Komponenten etwa des Hüttengases in welchen Mengen den industriell bereits etab-

lierten Prozess der Methanolsynthese beeinträchtigen. „Vor allem die üblichen Verdächtigen stören“, sagt Holger Ruland. Das sind zum Beispiel alle schwefelhaltigen Substanzen und größere Mengen Sauerstoff, von denen schon bekannt ist, dass sie Probleme machen. Denn sie vergiften den Katalysator aus Kupfer-, Zink- und Aluminiumoxid, der das denkbar reaktionsträge CO_2 und den Wasserstoff aktiviert, damit diese sich zu Methanol und Wasser vereinigen.

Alles in allem hat sich die Methanolsynthese bislang als ziemlich unempfindlich gegenüber dem meisten Schmutz in den fraglichen Abgasen erwiesen. „Viele haben bezweifelt, dass der Standardkatalysator mit CO_2 aus den Abgasen funktioniert, weil ihn die größere Menge Wasser, die dann entsteht, deaktivieren sollte“, sagt Ru-



FOTO: THOMAS HOHRK/MPI FÜR CHEMISCHE ENERGIEKONVERSION



Läuft: Christian Froese, Forscher des Max-Planck-Instituts für chemische Energiekonversion, kontrolliert im Oberhausener Carbon2Chem-Labor eine Methanolsynthese. Die Vakuumröhren im Vordergrund sind Teil eines Massenspektrometers.

land. Dass dies nicht geschieht, ist für die industrielle Umsetzung des Carbon2Chem-Konzepts eine gute Nachricht, denn einen neuen Katalysator zu suchen, kann ziemlich mühsam sein. Trotzdem ist die Arbeit der Chemiker noch nicht getan. Denn nicht nur, dass die Forschenden um Holger Ruland und Robert Schlögl den Prozess im Detail verstehen wollen, sie möchten ihn möglichst auch noch verbessern und an andere Abgase als die der Eisenverhüttung anpassen. Ein praktisch relevantes Problem haben die Chemiker beobachtet. „In Experimenten über mehrere Tau-

send Stunden verliert der Katalysator manchmal seine Aktivität, und irgendwann kommt sie wieder“, sagt Schlögl. Die Forscher haben schon einen Verdacht, woran es liegen könnte: an zu viel Sauerstoff. „Vielleicht reichen unsere Maßnahmen, den variierenden Sauerstoffanteil zu entfernen, nicht aus“, so Schlögl. Allerdings ist auch noch unklar, ob sich die unkontrollierten Aussetzer in einer industriellen Anlage überhaupt bemerkbar machen würden. „Wenn in einer Anlage mit 25 Tonnen Katalysator mal ein Kilo nicht funktioniert, ist das kein Problem“, so Schlögl.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Mit CO₂ aus Abgasen der Stahlindustrie – aber auch von Müllverbrennungsanlagen und Zementwerken – Methanol und andere chemische Grundstoffe zu produzieren, könnte den CO₂-Fußabdruck dieser Branchen reduzieren.

Im Carbon2Chem-Projekt haben Forschende festgestellt: Die etablierte Methanolsynthese mit Industrieabgasen ist möglich.

Ob das Konzept weit verbreitete Anwendung findet, hängt unter anderem davon ab, ob sich dafür genügend günstiger Wasserstoff mit erneuerbaren Energien erzeugen lässt.

Ob das launische Verhalten auch im großtechnischen Betrieb relevant ist und ob unter diesen Bedingungen vielleicht noch andere Schwierigkeiten auftreten, sind Fragen, die Forschende des Fraunhofer-Instituts Umsicht mit einer kleinen Demoanlage, aus der pro Stunde zwei Liter Methanol fließen, untersuchen. Der nächste Schritt soll eine Demoanlage im Duisburger Technikum sein, die mehrere Tausend Tonnen pro Jahr produziert. „Damit wollen wir beweisen, dass der Prozess auch im großen Maßstab und auf lange Zeit stabil arbeitet“, sagt Holger Ruland.

Dann wird die Methanolsynthese aus Hüttengas auch mit Wasserstoff gefüttert, der im Technikum erzeugt wird. Denn dem Klimaschutz dient der Prozess nur, wenn der Wasserstoff grün ist, also mithilfe von regenerativ erzeugtem Strom aus Wasser gewonnen wird. Das Problem ist, dass Windkraft und Fotovoltaik derzeit nur selten mehr Strom liefern, als gebraucht wird. Um im großen Stil grünen Wasserstoff produzieren zu können, müssten erneuerbare Stromquellen massiv ausgebaut werden, zu-

mal viele Bereiche der Wirtschaft bei ihrer klimafreundlichen Neuausrichtung auf Wasserstoff setzen, nicht zuletzt die Eisenverhüttung. Und selbst wenn es genügend Anlagen gibt, die den Bedarf prinzipiell decken könnten, wird das Angebot immer schwanken. Das bedeutet: Die Elektrolyse, die Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff spaltet, muss flexibel arbeiten und in einer windstillen Nacht wahrscheinlich sogar ganz gestoppt werden. Solche unkalkulierbaren Bedingungen machten den Betreibern von Elektrolyseuren bislang Sorgen: Sie fürchteten, dass die Anlagen damit nicht klarkämen und schnell den Dienst einstellen. Ob ihre Bedenken berechtigt sind, haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Thyssenkrupp AG und des Duisburger Zentrums für Brennstoffzellen-Technik ebenfalls untersucht.

Wo, kann man zurück im Duisburger Technikum sehen – in einer Halle, die etwa so hoch ist wie die Gasreini-

gungsanlage und nur ein paar Schritte davon entfernt steht. Um sie zu betreten, sind spezielle Sicherheitsvorkehrungen nötig, weil die Anlage mit Hochspannung und ätzender Lauge arbeitet. Aber ein Blick durchs Tor ist erlaubt. Im Elektrolyseur, der, eingehegt von einem Gerüst, nur relativ wenig Platz in der großen Halle braucht, sind brusthohe, hintereinander aufgereichte Platten zu erkennen. Zwischen ihnen entsteht der Wasserstoff. Das Gerät hat eine Tochterfirma von Thyssenkrupp entwickelt – sie vertreibt es bereits kommerziell. Und es ist flexibler als gedacht: Selbst bei unzeitigem Stromangebot läuft es einwandfrei. Ein weiteres Ergebnis, das der Anwendung des Carbon-2Chem-Konzepts den Weg ebnet.

Technisch steht dem CCU-Vorhaben, Abgase etwa der Stahlindustrie als Rohstoffquelle für Teile der Chemieproduktion zu nutzen, also nicht mehr viel im Wege. Ob die beiden Branchen das Konzept künftig umsetzen wer-

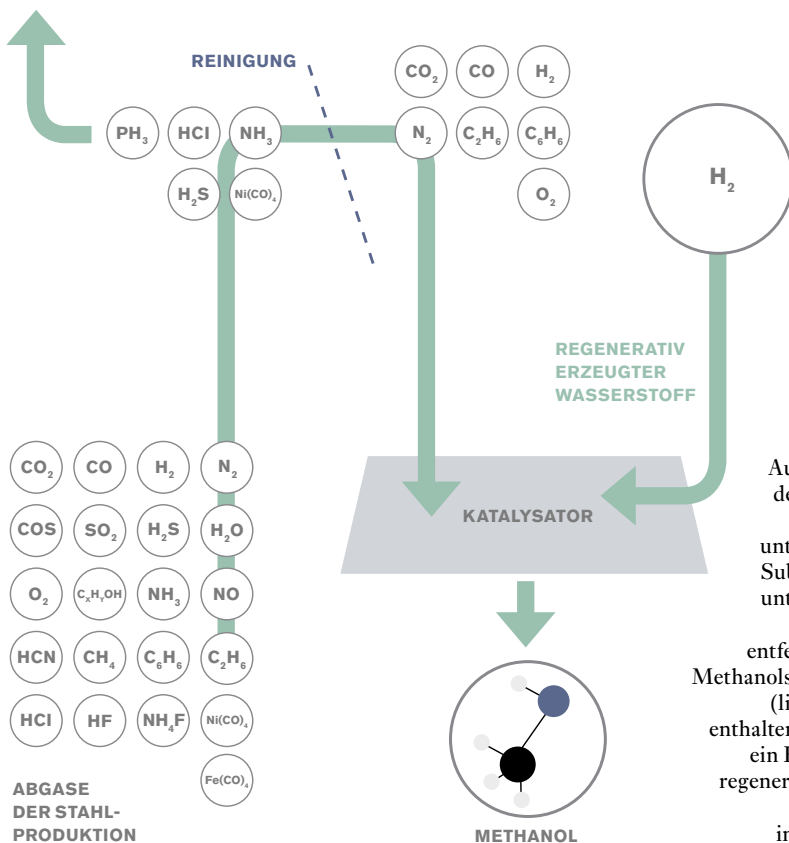
den, ist trotzdem noch offen. Da geht es um langfristige Investitionssicherheit und natürlich um die Kosten. „Sind die Kunden bereit, für grünen Stahl oder grünes Methanol einen Aufschlag zu zahlen?“, fragt Nina Kolbe. Der Klimaschutzbeitrag würde etwa beim Kauf eines Autos vielleicht ein paar Hundert Euro ausmachen. Unter den richtigen politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen könnten solche Güter auch bei höheren Produktionskosten konkurrenzfähig sein. Der künftige CO₂-Preis ist hier ein Faktor, aber nicht der wichtigste. „Eine entscheidende Frage ist, ob wir genügend günstigen Wasserstoff und dafür genügend regenerativ erzeugten Strom haben“, betont Holger Ruland ebenso wie andere Fachleute, die sich mit solchen CCU-Techniken beschäftigen.

Ein Weltmarkt für erneuerbare Energie

Robert Schlögl geht zwar davon aus, dass Wasserstoff deutlich billiger würde, wenn Elektrolyseure nicht mehr mit Manufaktur-, sondern mit moderner Fertigungstechnik gebaut werden. Doch das ändert nichts daran, dass es in Deutschland auch künftig wahrscheinlich nicht genügend grünen Strom gibt. Dem Mangel könnten Länder mit mehr Sonne und Wind abhelfen – zum Beispiel Namibia. Die Bundesregierung hat gerade eine Wasserstoffkooperation mit dem Staat im südlichen Afrika vereinbart: Eine Machbarkeitsstudie und ein Pilotprojekt sollen aufzeigen, ob Namibia zum Wasserstoffexporteur werden kann.

Das wäre auch ein Schritt hin zu einem Weltmarkt für erneuerbare Energie, so wie es ihn derzeit für fossile Brennstoffe gibt. In einem globalen Handel etwa mit Wasserstoff sieht Robert Schlögl, der die Wasserstoffstrategie der Bundesregierung mitentwickelt hat, das beste Mittel, Produkte aus Deutschland im weltweiten Wettbewerb konkurrenzfähig zu halten – ein besseres noch als EU-Zölle auf klimaschädliche Importe: „Dann bezahlen

GRAPHIK: GCGO NACH HOLGER RULAND/MPI FÜR CHEMISCHE ENERGIEKONVERSION



Aus den Abgasen der Stahlproduktion mit vielen unterschiedlichen Substanzen (links unten) werden die Komponenten entfernt, die bei der Methanolsynthese stören (links oben). Das enthaltene CO₂ wandelt ein Katalysator mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff in Methanol um.





Industriennahe Forschung: Mit dieser Anlage im Carbon2Chem-Technikum untersuchen Forschende schon beinahe im großtechnischen Maßstab, wie gut sich Gase, die bei der Stahlproduktion entstehen, reinigen lassen.

70

alle die erhöhten Preise.“ Das setzt natürlich voraus, dass es auch eine globale Nachfrage gibt, weil sich die Welt von fossilen Energieträgern abwendet. Schlögl ist da recht zuversichtlich: „Keiner kann die Berichte des Weltklimarats und die offensichtlichen Zeichen des Klimawandels mehr ignorieren.“

Allerdings genügt die Einsicht allein nicht, gerade Schwellenländer müssen sich die klimafreundliche Umgestaltung der Industrie auch leisten können. Zudem sind die Carbon2Chem- und andere CCU-Techniken gerade in puncto Klimaschutz vielleicht noch nicht effektiv genug. „Jedes System, das am Anfang fossile Rohstoffe nutzt und am Ende CO₂ freisetzt, ist problematisch, wenn wir klimaneutral werden wollen“, sagt Stefan Lechtenböhrer, der am Wuppertal Institut erforscht, wie sich Energie- und Industriesysteme klimafreundlich umgestalten lassen. Kurz- und mittelfristig könne CCU auf dem Weg zur klimaneutralen Wirtschaft

durchaus helfen, vor allem wenn das CO₂ in langlebige Produkte verwandelt wird: „Auf jeden Fall hat man das CO₂ dann gewissermaßen zweimal genutzt, und je nach Produkt auch für einige Jahrzehnte gespeichert.“ Der Wirtschaftswissenschaftler gibt aber zu bedenken, dass Kohlenstoff auf Dauer nur noch dort eingesetzt werden sollte, wo es keine Alternativen gibt. Stahl kann jedoch mit Wasserstoff erzeugt werden, nahezu ohne den Einsatz von Kohlenstoff. „Weil die Investitionszyklen in der Stahlindustrie lang sind, sollten wir gerade auch auf diese Lösung setzen. Wir könnten sonst Probleme bekommen, wenn wir bis 2045 netto kein CO₂ mehr ausstoßen wollen.“

Um künftig einmal verschiedene Routen nehmen zu können, findet Lechtenböhrer ein Projekt wie Carbon2Chem dennoch wichtig. Diese Haltung teilt Nina Kolbe selbstredend – auch in der Frage, ob die Stahlindustrie Eisen mit Wasserstoff statt Kohle erzeugen und damit CO₂ vermeiden

oder ob sie das Treibhausgas nutzen soll: „Beim Klimaschutz passiert in der Industrie weltweit derzeit sehr viel“, sagt die Wissenschaftlerin. „Wir sollten die beiden Ansätze verfolgen, um die CO₂-Emissionen möglichst schnell und kostengünstig reduzieren zu können.“

←

GLOSSAR

CARBON CAPTURE AND USE (CCU)
nutzt CO₂ aus Industrieabgasen für die Chemieproduktion.

HÜTTENGAS
entsteht im Hochofenprozess, in dem Eisenerz mit Kohlekoks zu Roheisen reduziert wird, und macht den größten Teil der CO₂-haltigen Abgase im Stahlwerk aus. Daneben fallen bei der Umwandlung von Kohle in Koks Kokereigas und von Eisen in Stahl Konvertergas an.

Warum so nachlässig?



Im Alter wird die biochemische Qualitätskontrolle in menschlichen Zellen nachlässig und das kann zu Alzheimer führen – eine gefürchtete Diagnose.

Franz-Ulrich Hartl und Ralf Jungmann wollen die Entstehungsprozesse dieser Mülldeponien in den Zellen besser verstehen.

Wir unterstützen ihr Projekt am Max-Planck-Institut für Biochemie, denn die tiefere zellbiologische Erkenntnis kann wichtige Hinweise auf mögliche Therapieformen liefern.

Die Max-Planck-Förderstiftung unterstützt seit über zehn Jahren die Max-Planck-Gesellschaft, indem sie an den mehr als 80 Instituten gezielt innovative und zukunftsweisende Spitzenforschung fördert und so Durchbrüche in der Wissenschaft ermöglicht. Im weltweiten Wettbewerb der Wissenschaften können Sie als privater Förderer einen entscheidenden Unterschied machen und Freiräume schaffen. Gehen Sie mit uns diesen Weg!

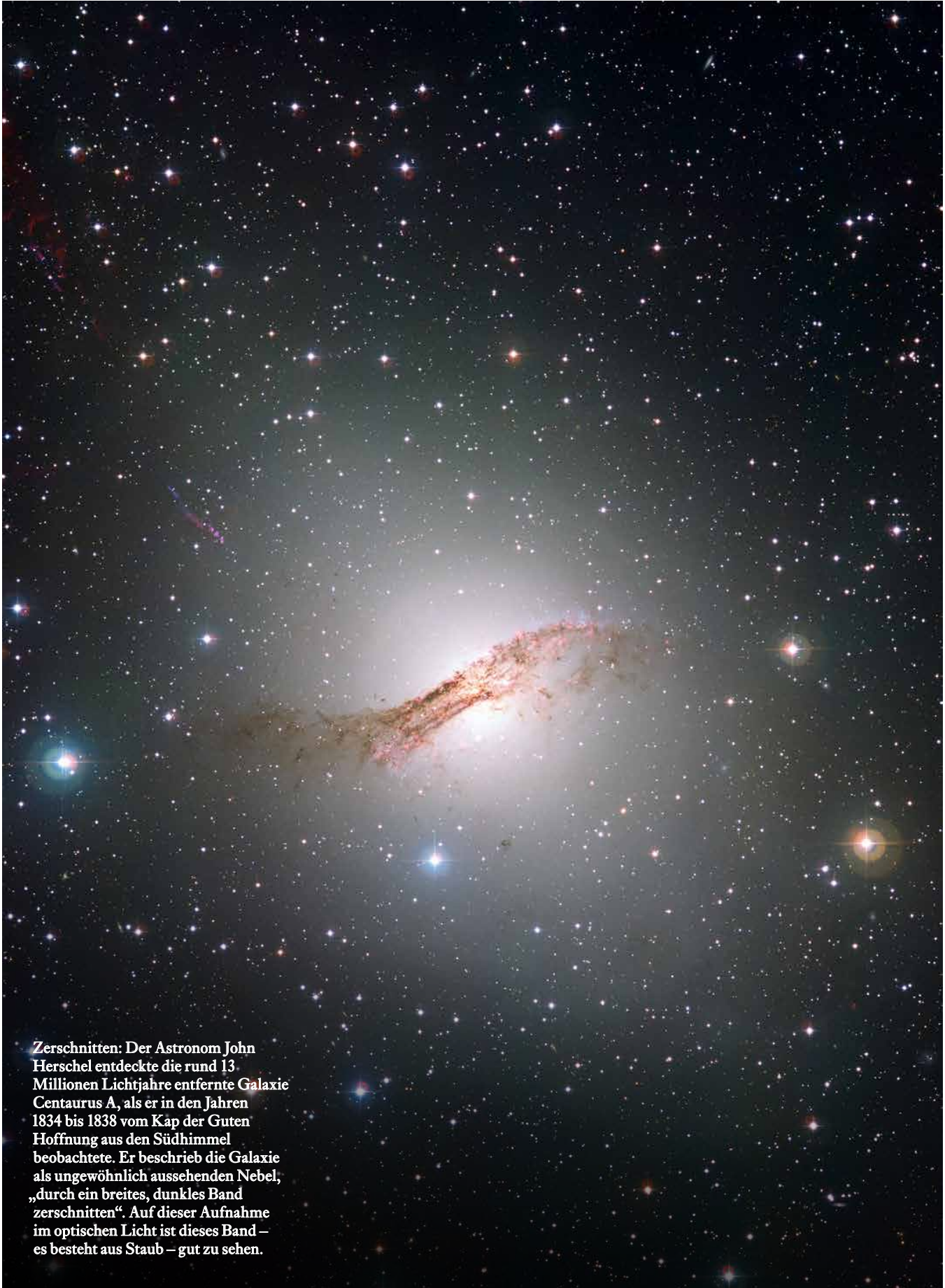
Max-Planck-Förderstiftung
Deutsche Bank
IBAN DE46 7007 0010 0195 3306 00

ANZEIGE

www.maxplanckfoundation.org



MAX PLANCK
Förderstiftung



Zerschnitten: Der Astronom John Herschel entdeckte die rund 13 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie Centaurus A, als er in den Jahren 1834 bis 1838 vom Kap der Guten Hoffnung aus den Südhimmel beobachtete. Er beschrieb die Galaxie als ungewöhnlich aussehenden Nebel, „durch ein breites, dunkles Band zerschnitten“. Auf dieser Aufnahme im optischen Licht ist dieses Band – es besteht aus Staub – gut zu sehen.

ZOOM INS HERZ VON CENTAURUS A

TEXT: HELMUT HORNUNG

Der Zentaur gehört zu den bekanntesten Konstellationen am Südhimmel. Wer das Sternbild mit dem Fernglas durchstöbert, entdeckt ein blasses Nebelfleckchen namens Centaurus A. Dahinter steckt eine ferne Milchstraße, in der ein supermassereiches schwarzes Loch sitzt. Michael Janssen vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn und der Radboud-Universität Nijmegen hat ein Team geleitet, das dieser Schwerkraftfalle mit dem Event Horizon Telescope jetzt so nahe gekommen ist wie niemals zuvor.

Die Geschichte von Centaurus A beginnt im 19. Jahrhundert am Kap der Guten Hoffnung. Dort, an der Südspitze Afrikas, hat sich der Astronom John Herschel eine Sternwarte eingerichtet. Von 1834 bis 1838 beobachtet er das Firmament und veröffentlicht ein paar Jahre später einen Katalog astronomischer Objekte. Darin beschreibt er unter anderem einen ungewöhnlich aussehenden Nebel, der „durch ein breites, dunkles Band zerschnitten“ ist.

Unter der Bezeichnung NGC 5128 wurde Herschels Entdeckung in den *New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* aufgenommen. Doch erst in den 1950er-Jahren fand man dank immer präziserer Messungen heraus, dass NGC 5128 eine eigenständige Milchstraße ist, eine Galaxie. Ihre Entfernung von der Erde wird heute mit rund 13 Millionen Lichtjahren angegeben.

Fahrt nahm die Erforschung von Centaurus A mit einem Artikel auf, den John Bolton gemeinsam mit zwei Co-Autoren 1949 im Wissenschaftsmagazin *Nature* veröffentlichte. Kurz nach dem Zweiten Weltkrieg hatten der britisch-australische Astronom und sein Team begonnen, kosmische Radioquellen mit Objekten zu identifizieren, die schon seit Längerem im sichtbaren Licht beobachtet wurden. Die Wissenschaftler nutzten ein völlig neues Beobachtungsfenster zum

All: die Radioastronomie. Deren Anfänge lagen damals nicht einmal zwei Jahrzehnte zurück.

In den frühen 1930er-Jahren fahndete Karl Jansky im Auftrag der US-amerikanischen Bell Telephone Laboratories in New Jersey nach unerwünschten Geräuschen bei der Übertragung von Rundfunksendungen. Mit einem ungefähr 30 Meter langen Ungetüm aus Holz und Draht lauschte der Physiker im Sommer 1931 in den Äther und machte den Störenfried tatsächlich dingfest – Gewitter!

Eigentlich hätte Jansky nun zufrieden sein können, wäre da nicht noch ein merkwürdiges, gleichmäßiges Zischen gewesen. Es schien von einer Quelle auszugehen, die sich innerhalb eines Tages mit Sterngeschwindigkeit – also in 23 Stunden, 56 Minuten und 4 Sekunden und damit exakt der Erdrotation folgend – über den Himmel

bewegte. Im Frühjahr 1933 stand fest, dass dieses Rauschen aus den Tiefen des Universums stammen musste.

Zwei Jahre später schrieb Karl Jansky: „Strahlung wird immer dann empfangen, wenn die Antenne auf die Milchstraße gerichtet ist.“ Gemeint war jenes schimmernde Band, das sich in einer klaren Sommernacht in unseren Breiten über das Himmelsgewölbe spannt. Es ist Teil jener Welteninsel, welche die Form einer leicht verbogenen Frisbeescheibe besitzt und Hunderte von Milliarden Sternen beherbergt – unter anderem unsere Sonne mit ihren acht Planeten.

Die Milchstraße im Visier

Die Wissenschaft nahm von Janskys Entdeckung allerdings keine Notiz. Nur einer erkannte das Potenzial der neuen Methode: Grote Reber. Mit Materialkosten von 2000 Dollar baute der Funkamateur eine fast zehn Meter große, voll bewegliche Schüssel, platzierte sie im Garten seines Hauses in Wheaton im US-Bundesstaat Illinois und richtete sie in jeder freien Minute auf die Milchstraße. Im Jahr 1943 veröffentlichte Reber die Daten seiner Himmelsdurchmusterung.

Allmählich begann sich diese Beobachtungstechnik zu etablieren. Ein paar Jahre später nutzte die Gruppe um John Bolton ein besonderes Radioteleskop an der australischen Küste. Dieses „Seeklippen-Interferometer“ registrierte gleichzeitig zwei Signale – das direkt von der Quelle am Himmel abgestrahlte und das von der Oberfläche des Pazifiks reflektierte. Durch die Überlagerung der beiden Signale, Interferometrie genannt, ließ sich ein virtuelles Radioteleskop von mehreren Hundert Metern Durchmesser simulieren.

Damit gelang es, starke Radioquellen wie Centaurus A, Virgo A und Taurus A, die bereits vorher bekannt gewesen waren, jeweils mit ihren opti-

schen Gegenstücken zu identifizieren: mit den Galaxien NGC 5128, M87 im Sternbild Jungfrau und dem Krebsnebel, einem Supernova-Überrest im Stier. Über diese Ergebnisse berichtete Boltons Gruppe in dem erwähnten *Nature*-Artikel.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Centaurus A wird seit vielen Jahrzehnten auch mit radioastronomischen Methoden beobachtet.

Dem Event Horizon Telescope ist jetzt ein bisher einmaliger Blick ins Zentrum dieser aktiven Galaxie gelungen, fast bis zum Fußpunkt eines symmetrischen Materiejets.

Die Messungen sollen den Mechanismus aufklären helfen, der diesen Jet nahe dem schwarzen Loch entspringen lässt.

Die Arbeit war ein kleines Kunststück, denn die Auflösung eines Teleskops hängt von der Wellenlänge ab. Je größer diese ist, desto weniger Details lassen sich darstellen. Radiostrahlung ist eine sehr langwellige Version des sichtbaren Lichts. Das Spektrum, welches die Erdatmosphäre in diesem Bereich durchlässt, reicht von Submillimeter- und Millimeterwellen jenseits des Infraroten über Wellen von Zentimetern bis zu einigen Metern Länge.

Wegen des geringen Auflösungsvermögens müssen Radioantennen stets recht groß sein, wie etwa die Schüssel des Teleskops in Effelsberg mit 100 Meter Durchmesser. Eine raffinierte Methode, die Natur auszutricksen, ist die Interferometrie. John Bolton nutzte sie als einer der Ersten. Auch das Event Horizon Telescope (EHT) arbeitet nach diesem Prinzip: Acht

über den Globus verteilte Antennen sind in mehr oder weniger großem Abstand voneinander zusammengeschaltet. Sie alle beobachten dasselbe Objekt am Himmel. Werden die empfangenen Signale überlagert, dann wirken die Antennen wie eine einzige, deren Durchmesser der größten Distanz der beteiligten Observatorien entspricht.

Beim Event Horizon Telescope ergibt sich auf diese Weise ein virtueller Antennendurchmesser von Erdgröße. Der EHT-Verbund empfängt Radiostrahlung von 1,3 Millimeter Wellenlänge und besitzt ein Auflösungsvermögen von einer zwanzigmillionstel Bogensekunde. Damit könnte man (die Erdkrümmung außer Acht lassend) theoretisch von München aus eine Zeitung lesen, die jemand auf einer Bank im New Yorker Central Park in den Händen hält.

Dem Event Horizon Telescope gelang das am 10. April 2019 der Öffentlichkeit präsentierte und mittlerweile ikonische erste Bild vom Schatten eines schwarzen Lochs. Diese Daten aus dem Zentrum der elliptischen Riesengalaxie M 87 wurden im Jahr 2017 aufgezeichnet. Auf dem Beobachtungsprogramm stand damals auch Centaurus A. Die nach langwieriger Analyse im Juli 2021 veröffentlichte Aufnahme zeigt das Herz dieser Galaxie, in dem ein schwarzes Loch mit 55 Millionen Sonnenmassen lauert. Aus ihm entspringt – wie bei den meisten aktiven Galaxien – ein Materiejet, der sich symmetrisch mehrere Hunderttausend Lichtjahre ins All erstreckt.

Sichtbare Details – kleiner als ein Lichttag

Zwar bleibt das schwarze Loch selbst verborgen. „Aber jetzt können wir zum ersten Mal einen extragalaktischen Radiojet auf Skalen untersuchen, die kleiner sind als die Entfernung, die das Licht an einem Tag zurücklegt“, sagt der Teamleiter Michael Janssen, der am Bonner Max-



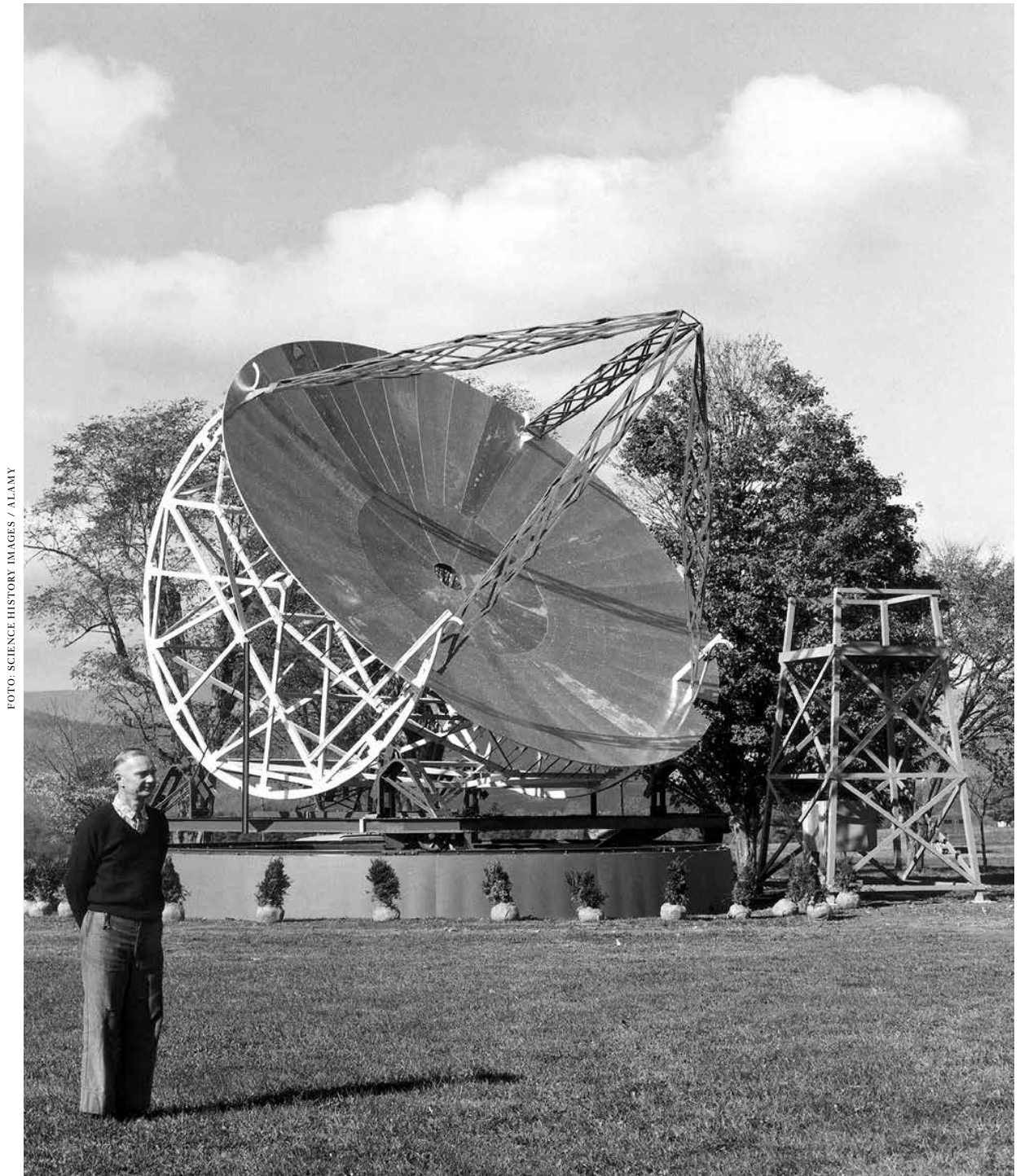
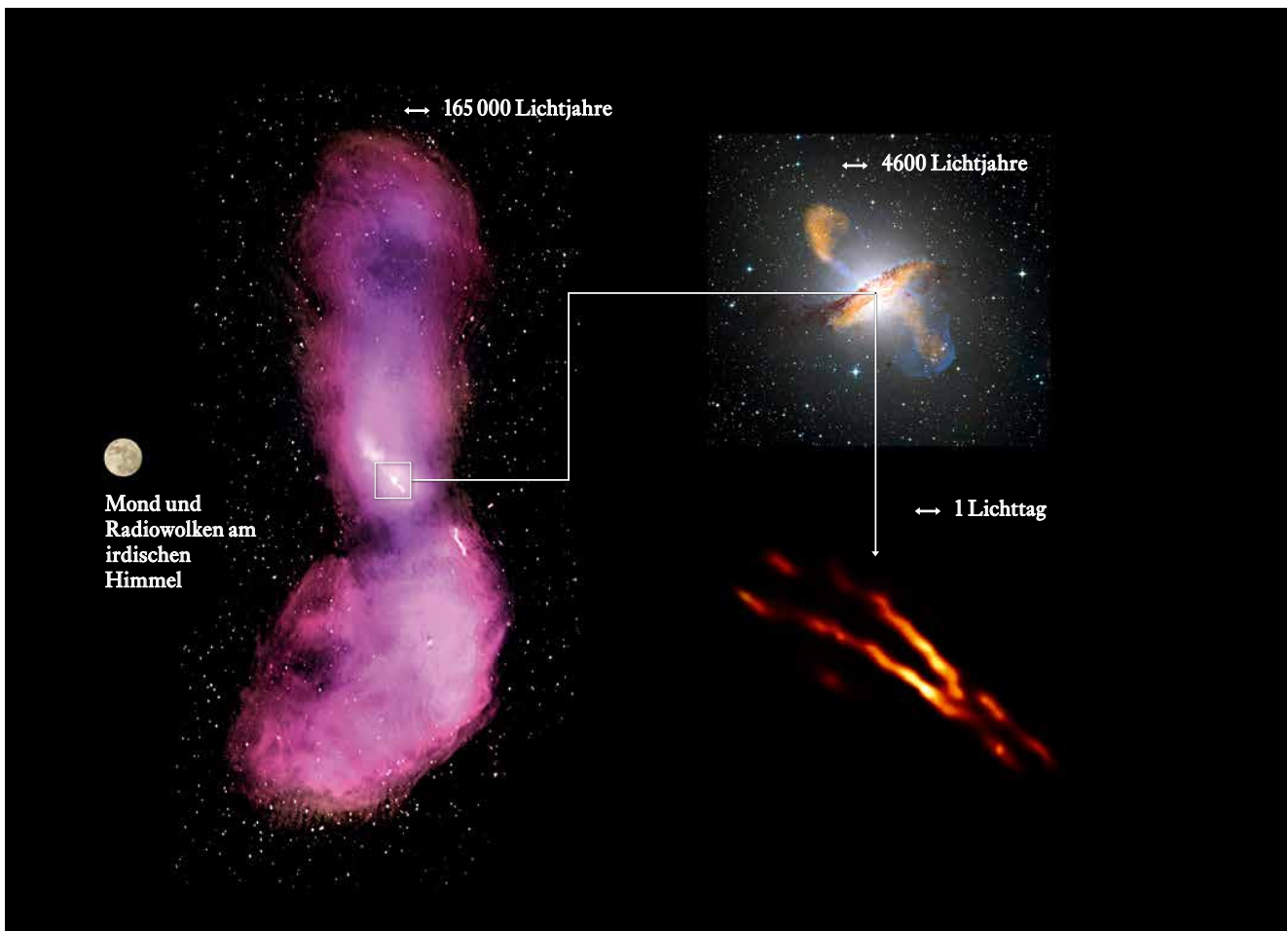


FOTO: SCIENCE HISTORY IMAGES / ALAMY

75

Pionier: In den 1930er-Jahren baute Grote Reber im Garten seines Hauses in Wheaton im US-Bundesstaat Illinois eine Schüssel, die heutigen Radioteleskopen gleicht. Im Jahr 1943 veröffentlichte Reber seine Daten einer vollständigen Himmeldurchmusterung – und öffnete damit ein neues Beobachtungsfenster zum All.



Mond und Radiowolken am irdischen Himmel

76

BILDER: R. BORS; CSIRO/ATNF/J. FEAIN ET AL.; R. MORGANTI ET AL.; S. JUNKES ET AL.; ESO/WFI; MPIFR/ESO/APEVA. WEISS ET AL.; NASA/CXC/CFA/R. KRAFT ET AL.; EHT/M. JANSSEN ET AL.

Annäherung: Die ausgedehnten symmetrischen Gaswolken des Jets von Centaurus A erstrecken sich im Bereich der Radiowellen am irdischen Himmel über 16 Vollmond Durchmesser (links). Die Überlagerung von Aufnahmen im Submillimeter- und im Röntgenbereich sowie im sichtbaren Licht zeigt nur die Galaxie selbst (oben rechts). Um viele Größenordnungen genauer ist der Blick ins Herz von Centaurus A mit dem Event Horizon Telescope – das Bild des Materiejets besitzt die höchste Detailauflösung (unten rechts).

Planck-Institut für Radioastronomie und an der Radboud-Universität Nijmegen forscht. „Wir sind hautnah dabei, wie ein solch gewaltiger Jet geboren wird.“

Supermassereiche schwarze Löcher, die sich in den Zentren aktiver Galaxien wie Centaurus A befinden, üben auf die Umgebung eine fast unwiderstehliche Anziehungskraft aus. Sie ernähren sich von Gas und Staub und setzen während der Mahlzeit gewaltige Energiemengen frei. Der größte Teil der Materie, die sich nahe dem Rand eines schwarzen Lochs befindet, fällt in den kosmischen Schlund. Doch einige der umgebenden Teilchen entkommen kurz vor dem Einfangen. Dabei entstehen „Jets“, deren Mechanismus immer noch Rätsel aufgibt.

Zwar versuchen Forschende mit unterschiedlichen Modellen zu erklären, wie genau sich Materie nahe einem schwarzen Loch verhält. Aber wie werden die Jets aus den galaktischen Zentren gestartet? Und wie können sie sich über viele Tausend Lichtjahre hinaus ins All erstrecken und dabei ihre Wirtsgalaxien an Größe weit übertreffen? Das EHT soll helfen, diese Fragen zu beantworten.

So zeigt das neue Bild, dass der Jet in Centaurus A an den Rändern heller ist als im Zentrum. Dieses Phänomen kennen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von anderen Jets, es wurde aber noch niemals derart deutlich beobachtet. „Mit diesem auffälligen Merkmal lassen sich jetzt sämtliche theoretischen Jetmodelle aus-

schließen, aus denen sich keine solche Randaufhellung ergibt“, erklärt Matthias Kadler, Astrophysiker an der Universität Würzburg. Zudem haben die EHT-Messungen ziemlich exakt die Position des schwarzen Lochs am Startpunkt des Jets identifiziert.

Zukünftig könnte es bei noch kürzerer Wellenlänge und höherer Detailauflösung gelingen, das schwarze Loch im Herzen von Centaurus A selbst abzubilden – analog jenem in der Riesengalaxie M 87. Die Forschenden wollen den Fokus dabei auf die Messung der Magnetfelder richten. „Ich bin sicher, dass wir die nötigen verbesserten Methoden zur Auswertung der Daten bald beherrschen werden“, sagt Anton Zensus, Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie.





*FORWARD.
VISION.
FUTURE.*

€ 25,000

Apply until
February 15th, 2022

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

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

Hermann Neuhaus's
**Hermann
Neuhaus
Prize**



Immer schön gelassen bleiben: Selbst im Straßenverkehr geben sich die Australierinnen und Australier gerne entspannt.

78

Max-Planck-Forschende kooperieren mit Partnern in mehr als 120 Ländern. Hier schreiben sie über ihre persönlichen Erfahrungen und Eindrücke. Alban Mariette vom Potsdamer Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie erforscht, wie Pflanzen ihre Zellwände aufbauen. Im Rahmen des Melbourne-Potsdam PhD Programme (MelPoPP) verbringt er zwei Jahre in Australien. Er erzählt, wie er die Zeit des Lockdowns erlebt hat, berichtet von seiner Work-Life-Balance als Doktorand und schwärmt von der großartigen australischen Landschaft.

Pflanzen haben weder Muskeln noch Knochen und nehmen doch komplexe Formen an. Sie bilden Stämme, Stängel, Zapfen, Baumstämme, aber auch Blüten und Blätter. Die Festigkeit und Struktur dieser Gewebe wird durch

die Zellwand gewährleistet, die jede Pflanzenzelle umgibt und hauptsächlich aus komplexen Polysacchariden besteht. In meiner Doktorarbeit untersuche ich, welche Rolle bestimmte Proteine – die sogenannten Nukleotid-Zucker-Transporter – bei der Zellwandsynthese spielen. Mithilfe fluoreszierender Biomarker kann ich die Proteine sichtbar machen, um sie im Mikroskop zu untersuchen.

Mein Studienobjekt ist die Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana*, eine unscheinbare kleine Pflanze mit winzigen weißen Blüten und gleichzeitig einer der beliebtesten Modellorganismen in der Pflanzenforschung. Um herauszufinden, welche Funktion die Transporterproteine haben, untersuche ich *Arabidopsis*-Pflanzen, die gentechnisch so verändert wurden, dass sie den betreffenden Transporter nicht mehr bilden können.

Als Doktorand arbeite ich am Potsdamer Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie sowie an der University of Melbourne. Im Jahr 2016 haben beide, gemeinsam mit der Universität Potsdam, das Melbourne-

Potsdam PhD Programme ins Leben gerufen. Das ergab für mich die Gelegenheit, auf zwei Kontinenten zu forschen. Ursprünglich war geplant, dass ich ein Jahr in Australien bleibe. Wegen der Pandemie hat sich jedoch alles verzögert, und aus einem Jahr wurden zwei.

Melbourne ist eine der wenigen australischen Städte, die von März bis Juni 2020 streng abgeriegelt waren. Man durfte sich nur eine Stunde pro Tag draußen aufhalten, und das nur in einem Umkreis von fünf Kilometern. Meine Experimente und die meiner Kollegen lagen während dieser Zeit völlig brach. Nur wenigen von uns war es erlaubt, alle drei Tage für zwei Stunden das Institut zu betreten, um die Pflanzen zu gießen. Im Juni wurden die Regeln schrittweise gelockert. Nun durften wir Doktoranden abwechselnd 20 Stunden pro Woche im Labor arbeiten. In einer normalen Arbeitswoche schaffe ich aber locker 50 Stunden. Zum Glück war es möglich, meinen Arbeitsvertrag am Potsdamer Max-Planck-Institut um ein Jahr zu verlängern. Nun plane ich, die Promotion dort im nächsten Sommer ab-

MELBOURNE, AUSTRALIEN

zuschließen. Melbourne ist eine grüne Stadt und ausgesprochen multikulturell. Die Lebensart ist sehr europäisch, und ich habe mich schnell heimisch gefühlt. Der Parkville Campus der Universität, wo sich die School of Biosciences befindet, liegt ganz in der Nähe des Stadtzentrums. So habe ich die Gelegenheit, während meiner täglichen Spaziergänge die Melbourner Kaffeekultur kennenzulernen. Während der Arbeit verbringe ich viel Zeit im Labor, im Gewächshaus oder am Mikroskop. Zum Ausgleich gehe ich ins Fitnessstudio und habe angefangen, argentinischen Tango zu tanzen. Ganz besonders gefällt mir die entspannte Haltung der Australierinnen und Australier: „No worries!“ ist einer der Sätze, die man hier am häufigsten hört.

Meine australischen Freunde sind zudem unglaublich reisefreudig. Unter dem Arbeitspensum als Doktorand ist es für mich schwierig, dieser Verlockung zu folgen. Für einen gemeinsamen Trip auf der Great Ocean Road habe ich mir dennoch die Zeit freigeschaufelt. Die bekannte Panoramastraße beginnt nicht weit von Mel-

bourne. Sie schlängelt sich durch eine großartige Landschaft, vorbei an den Zwölf Aposteln – steinerne Riesen, die den mythischen südlichen Ozean bewachen.

Auch eine andere Reise werde ich niemals vergessen: Im australischen Sommer 2019 verbrachte ich Weihnachten im östlichen Teil der Region Victoria, zusammen mit einer Gruppe von Doktoranden und Postdocs. Für einige von uns war es das erste Weihnachten in südlichen Gefilden, ganz ohne Schnee.

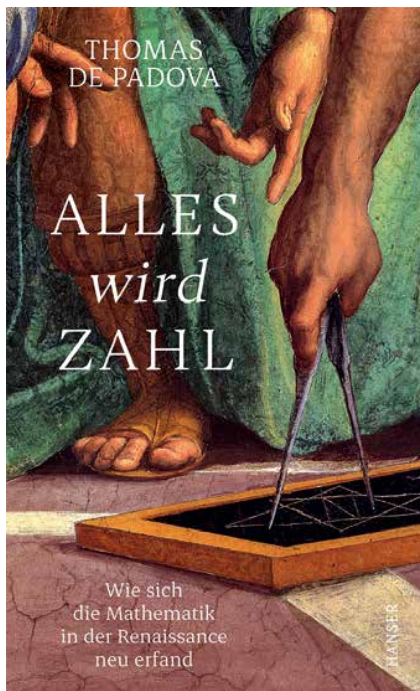
Leider fiel unser Aufenthalt in die Zeit der katastrophalen Buschbrände. Wir hatten gerade noch die Gelegenheit, diese reizvolle Küstenregion kennenzulernen, bevor sie vom Feuer verwüstet wurde. Zurück in Melbourne begannen einige von uns Masken zu tragen, um sich vor der katastrophalen Luftverschmutzung infolge der Brände zu schützen. Damals war das noch sehr ungewöhnlich, und wir kamen uns reichlich komisch vor. Wer hätte gedacht, dass Masken nur wenig später überall auf der Welt zum Alltag gehören würden!



FOTO: PRIVAT

Alban Mariette

26, stammt aus der Bretagne. Er ist Pflanzen- und Zellbiologe und hat an der Université de Rennes 1 und der Université Paris-Sud studiert. Im September 2018 begann er seine Promotion am Potsdamer Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie. In der Forschungsgruppe von Arun Sampathkumar in Potsdam und im Labor von Berit Ebert in Melbourne untersucht er die pflanzliche Zellwandsynthese.



MEILENSTEINE DER MATHEMATIK

Die Renaissance ist zugleich eine Zeit des Aufbruchs und der Rückbesinnung auf kulturelle Leistungen der Antike. Von Beginn des 15. bis Ende des 16. Jahrhunderts erleben in dieser Epoche viele Wissenschaften, wie etwa die Astronomie, eine Wiedergeburt, erfahren Architektur, Malerei oder Philosophie neue Impulse. Nicht von ungefähr rückt Nikolaus Kopernikus in einem grandiosen Perspektivwechsel die Sonne ins Zentrum des Planetensystems und löst damit eine „Revolution“ aus. Weniger bekannt, aber von enormer Bedeutung ist auch das Erwachen der Mathematik. Thomas de Padova beleuchtet in seinem Buch *Alles wird Zahl* die Hintergründe dieser kulturellen Umwälzung, in deren Folge die indisch-arabischen Ziffern in Europa erstmals zu einer Formelsprache zusammengefügt, Plus und Minus eingeführt werden und – ganz praktisch – Zahlen das kaufmännische Leben be-

stimmen. Der Autor erzählt von den Meilensteinen der Mathematik und unterhält auch jene prächtig, die in der Schule für dieses Fach nicht allzu sehr brannten. Auf der Reise in die Renaissance begegnet man berühmten Figuren wie Albrecht Dürer oder Leonardo da Vinci ebenso wie dem im Jahr 1501 in Pavia geborenen Universalgelehrten Girolamo Cardano, einem Pionier der Algebra. Sie alle haben ihren Teil dazu beigetragen, dass sich die Mathematik in der Renaissance neu erfinden konnte. Thomas de Padova holt dieses wenig bekannte Kapitel der Wissenschaftsgeschichte kenntnisreich ans Licht.

Helmut Hornung

Thomas de Padova
Alles wird Zahl
 382 Seiten, Carl Hanser Verlag
 25,00 Euro

80

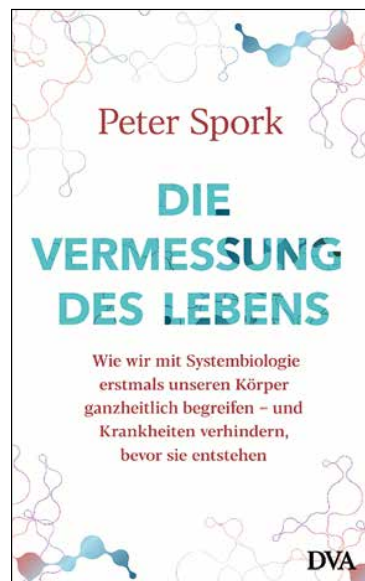
DATEN SAMMELN FÜR DIE GESUNDHEIT

„Zum ersten Mal in der Geschichte werden wir in der Lage sein, Alltagsentscheidungen über unsere Gesundheit auf der Grundlage von Daten zu treffen“, sagt der Alterungsforscher David Sinclair von der Harvard Medical School in Boston. Er ist einer von vielen Wissenschaftlern, mit denen Peter Spork im Rahmen seiner umfangreichen Recherchen gesprochen hat – unter ihnen auch Max-Planck-Forscher wie der Proteomik-Experte Matthias Mann. Das Buch ist ein Parforceritt durch die „-omik-Welten“, hinter denen sich das Ziel verbirgt, alle Daten zur Molekularbiologie unserer Zellen, Organe und Mikroben zu erfassen. Damit eröffnet sich ein neuer ganzheitlicher medizinischer Ansatz, der darauf abzielt, Krankheiten gar nicht erst entstehen zu lassen. Das Buch entwirft ein Bild von der Medizin der Zukunft, die mehr auf Vorbeugung als auf Reparatur setzt und aufgrund der rasanten Fortschritte der Biolo-

gie und der Computerwissenschaften stark datengetrieben sein wird. Dabei zeigt der Blick in die verschiedenen Labore, was derzeit schon möglich ist, aber auch, wo die Hürden liegen. So schürt der Datenhunger der Systembiologie zum einen die Angst vor dem gläsernen Patienten; zum anderen stellt sich die Frage nach den Kosten. Pionierunternehmen in den USA sind hieran schon gescheitert. Aber biotechnische Methoden verbilligen sich derzeit rasant. Die Hoffnung, dass dereinst Ärzte die Datenanalyse dem Computer überlassen und dafür wieder mehr Zeit für persönliche Gespräche haben, könnte also berechtigt sein.

Christina Beck

Peter Spork
Die Vermessung des Lebens
 336 Seiten, Deutsche Verlags-Anstalt
 24,00 Euro

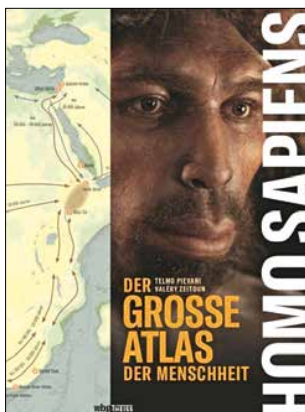


LANGER MARSCH

Wo die Menschen hinkommen, hinterlassen sie Spuren – manchmal überdauern diese sehr lange Zeit. Interessant sind etwa Fußabdrücke, die sich bis heute in Vulkanasche oder Sand erhalten haben und von einer Eigenart des Menschen zeugen: dem Gehen. In ihrem Atlas folgen die beiden Evolutionsbiologen Telmo Pievani und Valéry Zeitoun der Migrationsgeschichte der Menschenfamilie von den Anfängen im ostafrikanischen Grabenbruch bis zur Besiedlung der letzten unberührten Regionen in der Arktis, in Sibirien und Madagaskar. Auf Karten lassen sich die Wanderungen über Kontinente und Epochen hinweg verfolgen und die Lage der wichtigsten Fundorte prähistorischer Überreste lokalisieren. Weitere zentrale Themen des großartig bebilderten Bandes sind die unterschiedlichen Menschenformen, die zum Teil zur selben Zeit gelebt und sich miteinander vermischt haben. Fasziniert betrachtet der Leser etwa die lebensecht rekonstruierten Plastiken von Neandertalern und Denisovanern und erkennt in ihren Gesichtern Spuren seiner selbst. Der erste mit Ritzmustern versehene Stein aus Südafrika sowie die Elfenbeinfiguren und Höhlenmalereien von der Schwäbischen Alb und aus Frankreich zeugen von den Anfängen symbolischen Denkens. Auch der Vielfalt der Gene, Völker und Sprachen ist ein Kapitel gewidmet. Eindrucksvoller lässt sich die lange Reise der Menschheit kaum darstellen.

Harald Rösch

Telmo Pievani, Valéry Zeitoun
Homo Sapiens
208 Seiten, wbg Theiss
70,00 Euro



NEU ERSCHIENEN



81

RAVE IM RIFF

Im Juni 2021 ist die UNO-Dekade der Ozeanforschung für nachhaltige Entwicklung gestartet mit dem Ziel, die Meereswissenschaften in den Fokus zu rücken. Passend dazu ist das Buch der Meeresbiologin Julia Schnetzer erschienen, die am Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie promoviert hat. Sie schreibt darin über aktuelle Forschung und kuriose Meeresbewohner, ergänzt durch kleine Zeichnungen. So erfährt man zum Beispiel, was es mit dem psychedelischen Leuchten auf sich hat, das Korallen, Fische, Sepien, Krebse und andere Tiere unter UV-Licht erstrahlen lässt. Dahinter stecken Fluoreszenzproteine, die ganz unterschiedliche Funktionen erfüllen: In manchen Fällen dienen sie als Sonnenschutz oder Lichtfänger, in anderen zur Tarnung, zum Beutefang oder zur Kommunikation. Ein Nachttauchgang durch ein fluoreszierendes

Korallenriff hat für Schnetzer etwas von einem Technofestival. Das genaue Gegenteil sind die ultraschwarzen Tiefseefische, deren Haut so viel Licht schluckt, dass sie sich kaum fotografieren lassen. Ein großes Anliegen ist der Autorin der Schutz der Ozeane, und so verweist sie auch auf die Bedrohungen, etwa durch Plastikmüll. Als versierte Science Slammerin ist sie mit ihren Leserinnen und Lesern auf Du und Du und plaudert leichtfüßig über ihr Thema. Ein gelungenes Buchdebüt, das zu unterhaltsamen Streifzügen durch die Weltmeere einlädt.

Elke Maier

Julia Schnetzer
Wenn Haie leuchten
240 Seiten, hanserblau
18,00 Euro



FÜNF FRAGEN

ZU GENETISCH VERÄNDERTEN MÜCKEN

AN ELENA LEVASHINA

Frau Levashina, im Mai hat das britische Biotech-Unternehmen Oxitec in den USA erstmals genetisch veränderte Mücken freigesetzt. Den Männchen der Art *Aedes aegypti* ist ein Gen ins Erbgut eingepflanzt worden, welches die Entwicklung weiblicher Nachkommen verhindert. Auf diese Weise schrumpft die Mückenpopulation – und damit auch das Risiko einer Übertragung von Erregern wie dem Dengue- oder dem Zikavirus. In Florida haben betroffene Bürger gegen diesen Freilandversuch protestiert. Halten Sie denn das Experiment für sicher?

ELENA LEVASHINA Ich halte diesen Mechanismus für sehr sicher. Das eingefügte Gen führt lediglich zu einem Entwicklungsstopp bei einem Teil der Nachkommen. Wir reden hier also nicht von Mücken mit veränderten Eigenschaften. In Florida soll die Mückenpopulation schrumpfen oder vollkommen verschwinden und damit auch das eingesetzte Gen. Es werden außerdem nur transgene Männchen freigesetzt, die kein Blut saugen. Niemand kann also von einer genetisch veränderten Mücke gestochen werden. Auch ökologische Folgen sind nach meiner Meinung nicht zu befürchten. *Aedes aegypti* ist eine invasive Art in Florida, vor einigen Jahren hat es sie dort also noch gar nicht gegeben. Inzwischen macht sie rund vier Prozent der Mücken in der Region aus. Wenn die Art wieder aus dem Ökosystem verschwände, wäre das folglich gar kein Verlust. Hinzu kommt, dass Inseln wie die Flo-

rida Keys sehr gut für einen solchen Freilandversuch geeignet sind, denn sie begrenzen in jedem Fall die Ausbreitung der Moskitos.

Was könnte im schlimmsten Fall geschehen?

An sich nicht mehr, als dass das Ziel verfehlt wird und die Anzahl der Moskitos nicht zurückgeht. Das eingefügte Gen besitzt zum Beispiel eine Art Sicherheitsschalter: Es lässt sich mit dem Antibiotikum Tetracyclin ausschalten. Es wäre also theoretisch vorstellbar, dass Mücken im Umfeld landwirtschaftlicher Betriebe, welche das Antibiotikum in der Tierhaltung einsetzen, von der Genveränderung nicht betroffen wären. Da Tetracyclin heute allerdings kaum noch gebräuchlich ist, ist das sehr unwahrscheinlich und sicher auch im Vorfeld bereits geprüft worden.

Bei Insektenvernichtungsmitteln treten immer wieder Resistenzen auf. Ist das hier auch zu erwarten?

Die Forschenden haben das Gen bewusst in einer Region des Erbguts platziert, die für das Überleben der Mücken unverzichtbar ist. Eine Mutation in diesem Bereich ist in so gut wie jedem Fall tödlich und würde sich deshalb nicht ausbreiten. Außerdem ist die Zeit extrem kurz dafür, dass eine Mutation auftreten und sich ausbreiten kann. Laborexperimente zeigen, dass die Populationen schon nach wenigen Generationen – im Freiland also innerhalb einer Fortpflanzungsaison – zusammenbrechen.

Mit Insektiziden, Moskitonetzen und Impfungen gegen zumindest einige der von Mücken übertragenen Erkrankungen gibt es bereits verschiedene Strategien im Kampf gegen Infektionskrankheiten. Warum brauchen wir eine weitere?

Es ist immer gut, mehrere Pfeile im Köcher zu haben. Die bisherige Geschichte hat gezeigt, dass eine einzelne Waffe immer stumpf werden kann – zum Beispiel Pestizide, gegen die Mücken resistent geworden sind. Wir sollten dahin kommen, dass wir für jeden Ort und für jede infektiöse Mückenart genau wissen, welche Methode wir einsetzen müssen. Mit einem gezielten Einsatz können wir die Gefahr von Resistenzbildungen und die Folgen für die Umwelt minimieren.

Worauf sollte man bei künftigen Freisetzungsversuchen achten?

Die Proteste in Florida zeigen, dass wir die Ängste der Menschen ernst nehmen müssen. Dagegen helfen nur Transparenz bei den Versuchen, die Veröffentlichung der Daten, frühzeitige öffentliche Debatten und Bildung: Wer Nutzen und Risiken der Technik kennt, kann sich selbst ein Urteil bilden.

Interview: Harald Rösch

Dr. Elena Levashina ist Gruppenleiterin am Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie.

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

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

- Jupiter, Florida

Brasilien

- Manaus

Luxemburg

- Luxemburg



IMPRESSUM

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

Redaktionsanschrift

Hofgartenstraße 8
80539 München
089 2108-1719 / -1276 (vormittags)
mpf@gv.mpg.de
www.mpg.de/mpforschung
Kostenlose App: www.mpg.de/mpfmobil

Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung

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

Redaktion

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

Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)
Annabell Kopp (-1819)

Konzeptionelle Beratung

Sandra Teschow und Thomas Susanka
www.teschowundsusanka.de

Gestaltung

GCO Medienagentur
Schaezlerstraße 17
86150 Augsburg
www.gco-agentur.de

Druck & Vertrieb

Vogel Druck & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg

Anzeigenleitung

Beatrice Rieck
Vogel Druck & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg
0931 4600-2721
beatrice.rieck@vogel-druck.de

Max Planck Forschung berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den Max-Planck-Instituten und richtet sich an ein breites wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemeinverständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (*Max Planck Research*) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr. Die Auflage dieser Ausgabe beträgt 82 000 Exemplare (*Max Planck Research*: 10 000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in *Max Planck Forschung* vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der Max-Planck-Gesellschaft und ihrer Organe interpretiert werden.

Die Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. unterhält 86 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 23 900 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6900 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2020 umfasste insgesamt 1,92 Milliarden Euro. Die Max-Planck-Institute betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die Max-Planck-Gesellschaft ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.

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



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

MAX PLANCK
GESELLSCHAFT

