

Ausgabe 02 | 2022

# MAX PLANCK

*Forschung*

**GESELLSCHAFT**

Im Schatten des Rechtsstaats

**KÜNSTLICHE INTELLIGENZ**

Maschinelles Lehren

**ASTRONOMIE**

Blick auf einen kosmischen Donut



GEREGELTES  
DURCHEINANDER



BILD: IMAGO / WESTEND61

**W**er bedroht hier eigentlich wen? Der junge Hai scheint vom Jäger zum Gejagten geworden zu sein. Dabei lernt er nur kennen, welche Vorteile ein Schwarm den kleineren Fischen bietet: Das Gedränge der Beutetiere verwirrt den Angreifer, und der Schwarm ist ihm in seiner Reaktion immer einen Flossenschlag voraus.

# EDITORIAL

---

Liebe Leserin, lieber Leser

In vielen modernen Gesellschaften ist Individualität sehr wichtig – seinen eigenen Weg gehen, auch mal gegen den Strom schwimmen. Das Leben in einem Schwarm ist da ganz anders: Jedes Mitglied muss seine Nachbarn permanent im Blick haben und seine Bewegungen an das Verhalten der anderen anpassen, sonst löst sich der Schwarm auf. Schwärme gibt es bei Zellen, bei Tieren und auch bei uns Menschen. Für viele stehen sie sinnbildlich für Unordnung und Chaos. Dabei folgen die Individuen strengen Regeln. Die wichtigsten haben Forschende inzwischen identifiziert: Tun, was die anderen tun, und den anderen nicht zu nahe kommen.

Schwärme funktionieren scheinbar wie von Geisterhand. Sie besitzen keine Anführer. Niemand bestimmt, wo es langgeht. Die Individuen organisieren sich vielmehr selbst. Das Resultat sind zum Beispiel schwarmartige Verbände von Immunzellen, die Krankheitserreger im Körper überwältigen. Signalstoffe locken immer mehr Zellen an. Doch wie löst sich der Verband wieder auf? Das haben Forschende am Freiburger Max-Planck-Institut für Immunbiologie und Epigenetik nun herausgefunden.

Die riesigen Fischschwärme der Ozeane sind ein beeindruckendes Naturschauspiel. Am Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie in Konstanz wird mithilfe modernster Technik analysiert, was einen Schwarm zusammenhält und welche Vorteile er bietet. Fischähnliche Schwimmroboter demonstrieren dabei, wie sich beim gemeinsamen Schwimmen Energie sparen lässt.

Das Zusammentreffen vieler Individuen hat aber auch seine Schattenseiten, wie die Massenpaniken auf der Loveparade in Duisburg oder beim Hadsch in Mekka zeigen. Die Auslöser dafür sind jedoch nicht Leichtsinn oder religiöser Fanatismus; der Ablauf der Ereignisse folgt vielmehr den Gesetzen der Physik. Wie sich das Risiko solcher Katastrophen verringern lässt, ist ein Thema am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin.

Schwärme sind also ein vielseitiges Phänomen und ein lohnenswertes Objekt für die Forschung. Es würde uns freuen, wenn Sie beim Lesen der Fokus-Artikel und des gesamten Hefts ins Schwärmen gerieten ...

In diesem Sinne wünschen wir Ihnen eine interessante Lektüre!

Ihr Redaktionsteam



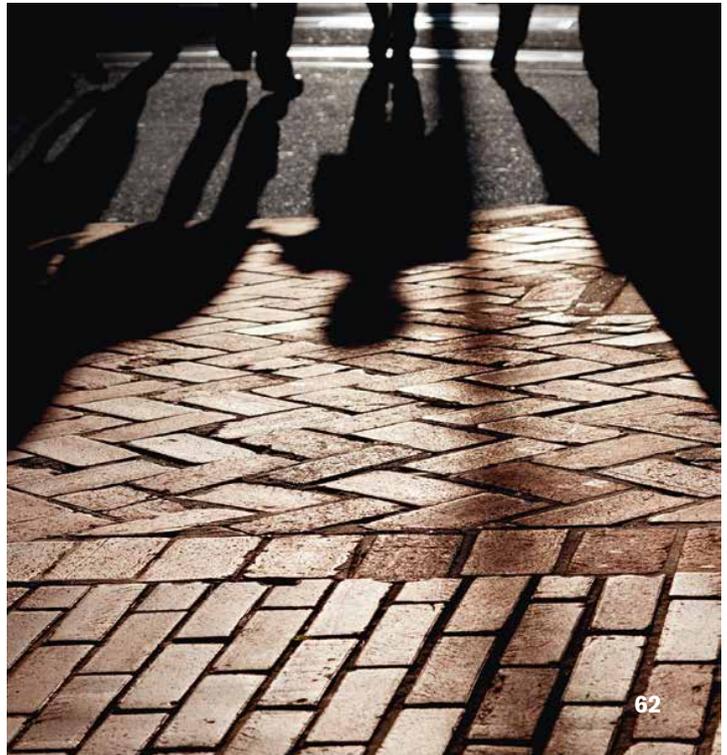
32



46



56



62

**32 | AUSSERSTANDE**

In Menschenansammlungen wie beim Hadsch in Mekka gibt es im Fall einer Massenpanik kein Entrinnen.

**46 | AUSSERIRDISCH**

Die Astrophysikerin Laura Kreidberg untersucht die Atmosphäre von extrasolaren Planeten.

**56 | AUSSERORDENTLICH**

Seegrasswiesen speichern im Boden unter ihren Wurzeln gigantische Mengen an Zucker und binden Kohlendioxid.

**62 | AUSSERGERICHTLICH**

Gemeinschaften wie Reichsbürger oder Rockerbanden lösen Konflikte oftmals ohne Polizei und Justiz.

FOTOS: MUHANNAD FALA'AH/GETTY IMAGES (LINKS OBEN); ANNA ZIEGLER (RECHTS OBEN); HYDRA MARINE SCIENCES GMBH (LINKS UNTEN); ISTOCK/TNTEMERSON (RECHTS UNTEN)

## 03 | EDITORIAL

## 06 | ORTE DER FORSCHUNG

Windtunnel in Jena

## 08 | KURZ NOTIERT

## 16 | ZUR SACHE

### Flüchtlingshilfe pragmatisch denken

Europa erlebt gerade die größte Fluchtbewegung seit dem Zweiten Weltkrieg. Doch anders als im Jahr 2015 werden die Flüchtenden an den Grenzen nicht zurückgewiesen. Was unterscheidet die heutige Situation von damals?

## 22 | INFOGRAFIK

Windkraft, aber richtig

## IM FOKUS

Geregeltes Durcheinander

## 24 | Wirbel im Schwarm

Nach welchen Regeln sind Fischschwärme organisiert, und welche Vorteile bietet das Leben im Kollektiv? Mithilfe modernster Technik wollen Forschende diese Fragen beantworten.

## 32 | Neun pro Quadratmeter

Die Bewegungen von Einzelpersonen in dichten Menschenmengen folgen physikalischen Gesetzen. Berechnungen können helfen, Versammlungen zu steuern und Massenunfälle zu vermeiden.

## 40 | Lockstoffe für das Kollektiv

Manche Immunzellen gehen im Schwarm auf die Jagd nach Krankheitserregern. Forschende untersuchen, wie sich solche Gruppen aus Hunderten von Zellen zusammenschließen und wieder auflösen.

## 46 | BESUCH BEI

Laura Kreidberg

## 54 | ZWEITER BLICK

## WISSEN AUS

## 56 | Schlaraffenland im Mittelmeer

Seegraswiesen speichern in ihrem Wurzelbereich große Zuckermengen. Damit binden sie klimaschädliches Kohlendioxid aus der Atmosphäre.

## 62 | Im Schatten des Rechtsstaats

Auch in Deutschland gibt es Gemeinschaften, die zur Lösung von Konflikten auf ihre eigenen Mittel zurückgreifen.

## 68 | Maschinelles Lehren

Künstliche Intelligenz soll Kindern helfen, das Programmieren zu erlernen. Der Ansatz lässt sich auch auf andere Fächer übertragen.

## 72 | Quantenrechner auf dem Sprung

Regierungen und Unternehmen investieren derzeit massiv in die Quanteninformationstechnologie. Ist der Hype gerechtfertigt?

## 80 | Blick auf einen kosmischen Donut

Neue Teleskopaufnahmen rücken das schwarze Loch im Herzen unserer Milchstraße in den Fokus der Wissenschaft.

## 82 | POST AUS ...

Stockholm, Schweden

## 84 | NEU ERSCHIENEN

## 86 | FÜNF FRAGEN

Zu Papageien

## 87 | IMPRESSUM

## TECHMAX

Magische Moleküle – organische Katalysatoren beflügeln die Chemie



*AUF DER  
DUFTSPUR*

6

FOTO: ANNA SCHROLL FÜR MFG



# ORTE DER FORSCHUNG

---



**P**arfümverbot am Arbeitsplatz – geht das nicht ein bisschen zu weit? Nun, um den Geruchssinn von Insekten zu untersuchen, sind noch ganz andere Vorkehrungen notwendig. Denn manche von ihnen haben ein so extrem feines „Näschen“, dass sie sogar einzelne Moleküle eines Geruchstoffes in der Luft wahrnehmen können. Bill Hansson und sein Team am Max-Planck-Institut für chemische Ökologie wollen die Evolution des Geruchssinns verstehen. Einer ihrer bevorzugten Probanden ist der Tabakschwärmer *Manduca sexta*. Seine „Nase“ sind die großen, sehr beweglichen Fühler oder Antennen. Mit ihrer Hilfe finden die Falter ihre Partner, Nektarquellen und die Pflanzen, an denen die Weibchen die Eier ablegen, mit absoluter Präzision.

7

Wie machen sie das? Müssen die Tiere dieses Verhalten lernen? Und welche Strukturen im Gehirn sind wie daran beteiligt? Um das herauszufinden, steht den Forschenden ein hochmoderner Windtunnel zur Verfügung. Die Anlage erzeugt pro Sekunde bis zu 800 Liter vollklimatisierte Luft, die Temperatur lässt sich im Bereich von 15 bis 30 Grad Celsius, die Luftfeuchtigkeit von 20 bis 90 Prozent regulieren. Die Luft wird dabei immer frisch angesaugt und aufbereitet. Die Beleuchtung erfolgt über eine Lichtdecke aus LEDs, die Tag- und Nachtlicht simulieren kann.

Tabakschwärmer sind überwiegend nachtaktiv, deshalb findet der hier gezeigte Versuch bei Rotlicht statt, das die Tiere nicht sehen können. Der Falter startet von einer Transportchambre, am anderen Ende des Tunnels befindet sich eine Tabakpflanze. Deren natürliche Düfte oder auch dort platzierte Duftstoffe trägt der Wind, der hinter der Pflanze einströmt, in Richtung des Falters, dessen Verhalten nun genau beobachtet und aufgezeichnet werden kann.

# MAX-PLANCK-PRÄSIDENT NEU GEWÄHLT

FOTO: MPI FÜR MULTIDISZIPLINÄRE  
NATURWISSENSCHAFTEN



Präsident in spe: Patrick Cramer wird ab Juni 2023 an der Spitze der Max-Planck-Gesellschaft stehen.

Der Senat der Max-Planck-Gesellschaft hat im Juni Patrick Cramer zum künftigen Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft für die Amtsperiode 2023 bis 2029 gewählt. Der 53-jährige Chemiker und Molekularbiologe ist geschäftsführender Direktor am Max-Planck-Institut für Multidisziplinäre Naturwissenschaften in Göttingen. Er wird sein neues Amt im Juni 2023 von Martin Stratmann übernehmen, der seit acht Jahren an

der Spitze der Max-Planck-Gesellschaft steht. Patrick Cramer ist seit 2014 Wissenschaftliches Mitglied der Max-Planck-Gesellschaft. Zuvor hatte er dreizehn Jahre eine Professur für Biochemie an der Ludwig-Maximilians-Universität München inne. In dieser Zeit war er unter anderem als Direktor des Genzentrums München und als Dekan der Fakultät für Chemie und Pharmazie tätig. Promoviert wurde Cramer am Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) im französischen Grenoble. Von 1999 bis 2001 forschte er an der Stanford University in den USA bei dem späteren Nobelpreisträger Roger Kornberg. Als Wissenschaftler genießt Cramer große Anerkennung, was durch eine Vielzahl von Wissenschaftspreisen untermauert wird, darunter der Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis 2006, der Ernst Jung-Preis für Medizin 2009 sowie der Louis-Jeantet-Preis für Medizin 2021. Patrick Cramer war und ist in verschiedenen nationalen und internationalen Gremien tätig. Wissenschaftspolitische Erfahrung hat er unter anderem durch seinen Vorsitz im Rat des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie gesammelt.

[www.mpg.de/18840892](http://www.mpg.de/18840892)



Stand with Ukraine: Auch die Max-Planck-Gesellschaft unterstützt Mitarbeitende aus dem vom Krieg erschütterten Land.

FOTO: EDOARDO CERIANI / UNSPLASH

## HILFSPAKET FÜR DIE UKRAINE

Um ukrainischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zu helfen, hat die Max-Planck-Gesellschaft einen Sonderfonds über zunächst eine Million Euro eingerichtet. Ziel ist es, Anschlussverträge für an den Max-Planck-Instituten befristet beschäftigte ukrainische Mitarbeitende zu finanzieren sowie Stipendien für die Aufnahme weiterer geflüchteter Gast- und Nachwuchsforschender aus der Ukraine einzurichten. Die Institute können diese Mittel im Bedarfsfall beantragen. Schon jetzt hat eine Reihe von Max-Planck-Instituten ihr Gästeprogramm mit Eigenmitteln ausgebaut und bietet zusätzliche Fellowships für die kommenden Monate an. Darüber hinaus hat die Max-Planck-Gesellschaft Kontakt zu der Ukrainischen Akademie der Wissenschaften aufgenommen, um mittel- und langfristig die Forschung in der Ukraine zu unterstützen. Denkbar wäre etwa, in dem Land Partnergruppen für ehemalige ukrainische Postdocs einzurichten.

[www.mpg.de/18467405](http://www.mpg.de/18467405)

## AUSGEZEICHNET ★

FRANK EISENHAUER

Für die Entwicklung von Instrumenten, die Beweise für die Existenz eines schwarzen Lochs im Zentrum unserer Milchstraße gesammelt haben, erhält Frank Eisenhauer vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik den Gruber-Kosmologiepreis. Im Jahr 2018 beobachteten Forschende mit dem Experiment Gravity verschiedene Phänomene in der Nähe von Sagittarius A\*, einem supermassereichen und unsichtbaren Objekt im Zentrum unserer Milchstraße. Dank Frank Eisenhauers technischen Innovationen fand das Gravity-Team heraus, dass die Bewegungen von Sternen und Gas in der Nähe des galaktischen Zentrums mit theoretischen Vorhersagen über ein schwarzes Loch übereinstimmen.



FOTO: ESO / M. ZAMANI



## GEOANTHROPOLOGIE KOMMT NACH JENA

Das Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in Jena wird im Zuge der Neuausrichtung in Max-Planck-Institut für Geoanthropologie umbenannt. So hat es der Senat der Max-Planck-Gesellschaft im Juni beschlossen. Das wissenschaftliche Konzept stammt maßgeblich von Jürgen Renn, Direktor am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin. Er wird die Umsetzung des Konzepts auch als Direktor am Institut vorantreiben. Dort werden in Zukunft die Wechselbeziehungen zwischen der Geosphäre und menschengemachten Systemen erforscht. Das Institut verbindet Forschungsgebiete aus allen drei wissenschaftlichen Sektionen der Max-Planck-Gesellschaft.

Ein zentrales Thema ist etwa die Mensch-Ökosystem-Dynamik, wofür Daten und Expertisen aus der Klimaforschung, der Biodiversitätsforschung und den Sozialwissenschaften zusammengeführt werden. Inter- und transdisziplinäre Forschungsprojekte befassen sich beispielsweise mit der Urbanisierung, der Welternährung sowie den globalen Material-, Energie- und Informationsflüssen. Die Kernfragen reichen dabei von der tiefen Vergangenheit bis hin zur fernen Zukunft und schließen die Frage mit ein, wie die Menschheit die Entstehung des Anthropozäns vorangetrieben hat und wie sich dessen Verlauf noch positiv beeinflussen lässt.

[www.mpg.de/18858245](http://www.mpg.de/18858245)

## AMAZON UND GOOGLE ALS PARTNER

Amazon und die Max-Planck-Gesellschaft haben Ende Mai vereinbart, wissenschaftlich zu kooperieren. Ziel des gemeinsamen Science Hub ist es, die Forschung zu künstlicher Intelligenz insbesondere in Fragen von Kausalität, Computer Vision und Machine Learning voranzutreiben. Amazon stellt bereits im ersten Jahr knapp 700 000 Euro zur Verfügung und unterstützt damit die Finanzierung und die Umsetzung von Forschungsprojekten sowie die Aus- und Weiterbildung talentierter Doktorandinnen und Doktoranden. Zudem erhalten Forschende der Max-Planck-Gesellschaft die Möglichkeit, nebenamtlich bei Amazon zu arbeiten und dadurch tiefere Einblicke in anwendungsbezogene Forschungsfragen zu erhalten. Die Kooperation ist zunächst auf fünf Jahre angelegt. Eine weitere Partnerschaft haben das Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken und Google, und sie bauen ihre Kooperation nun aus. Anfang Juni gründeten sie gemeinsam das Saarbrücken Research Center for Visual Computing, Interaction and Artificial Intelligence (VIA). Das Forschungszentrum soll in den zukunftsweisenden Bereichen Computergrafik, Computer Vision und Mensch-Maschine-Interaktion an der Schnittstelle von künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen Grundlagenforschung betreiben. Designierter Leiter des VIA ist Christian Theobalt, Direktor am Max-Planck-Institut für Informatik.

[www.mpg.de/18708913](http://www.mpg.de/18708913)  
[www.mpg.de/18778066](http://www.mpg.de/18778066)

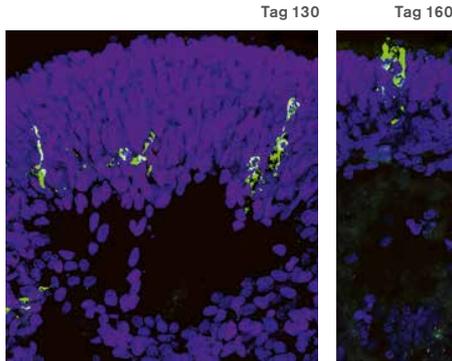
## AUF KOLLISIONSKURS

Energie aus Wind und Sonne ist der Schlüssel im Kampf gegen die Klimakrise. Doch Vögel und andere fliegende Tiere können mit den Rotorblättern von Windrädern kollidieren und sterben. Die Betreiber von Windparks könnten die Auswirkungen der Anlagen auf die Tierwelt allerdings begrenzen, wenn sie das Kollisionsrisiko für Vögel im Planungsprozess bereits frühzeitig berücksichtigen. Forschende des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie in Konstanz und der University of East Anglia in England haben nun die dafür erforderlichen Daten präsentiert. Das Team hat Hotspots in Europa identifiziert, in denen Vögel durch Windkraftanlagen und Stromleitungen besonders gefährdet sind: die westliche Mittelmeerküste Frankreichs, Süd-

spanien, die marokkanische Küste und die Meerenge von Gibraltar, Ostrumänien, die Sinaihalbinsel und die deutsche Ostseeküste. Den Autoren zufolge sollte der Bau neuer Windkraftanlagen und Hochspannungsleitungen in diesen hochsensiblen Gebieten auf ein Minimum beschränkt werden. In einer weiteren Studie wurden mit GPS-Sendern ausgestattete Schwarzmilane beim Anflug auf Windkraftanlagen beobachtet. Die Daten zeigten, dass die Vögel nicht direkt bis zu den Windrädern fliegen, sondern den Rotoren bereits in einem Kilometer Entfernung ausweichen. Zumindest ein Teil der Vögel erkennt also die Gefahr und hält einen entsprechenden Sicherheitsabstand ein.

[www.mpg.de/18547303](http://www.mpg.de/18547303)

BILD: MPI FÜR MOLEKULARE BIOMEDIZIN/ YOTAM MENUCHIN-LASOWSKI



Mittels Immunfluoreszenz (grün) wiesen die Forschenden Sars-CoV-2-infizierte Zellen im Netzhaut-Organoid nach.

## CORONA GEHT INS AUGEN

10

Sars-CoV-2 ist ein Multiorganvirus, welches verschiedene Gewebe des menschlichen Körpers befällt. Autopsien von Patienten, die an Covid-19 gestorben waren, haben das Virus auch in der Netzhaut nachgewiesen. Dazu passt, dass während oder nach einer Coronainfektion vereinzelt auch Sehstörungen auftreten. Unklar war allerdings, welche Netzhautstrukturen befallen werden und ob die Schäden möglicherweise nur eine indirekte Folge des Virus sind. Forschende des Max-Planck-Instituts für molekulare Biomedizin und der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster haben die Auswirkungen der Sars-CoV-2-Infektion auf die Netzhaut daher im Laborexperiment untersucht. Als Modell verwendeten sie Netzhaut-Organoiden, die sich aus umprogrammierten menschlichen Stammzellen züchten lassen. In den Versuchen infizierte Sars-CoV-2 diese Organoiden tatsächlich und vermehrte sich darin. Dabei waren vor allem retinale Ganglienzellen betroffen, aber auch Lichtsinneszellen. Pathologien der Netzhaut sollten deshalb als eine mögliche Folge von Long Covid genauer beobachtet werden.

[www.mpg.de/18451525](http://www.mpg.de/18451525)

Gänsegeier in der Nähe von Windkraftanlagen in Südspanien. Allein in der Region um Gibraltar sterben jedes Jahr mehr als hundert dieser Vögel sowie Dutzende von Schlangenadlern und Turmfalken.



FOTO: ALEJANDRO ONRUBIA

## ALARMANLAGE GEGEN HARDWARE-ATTACKEN

### HEISSER ATEM

Lust bewirkt nicht nur, dass die Genitalien stärker durchblutet werden, der Puls steigt und die Pupillen sich weiten. Sie lässt sich auch im Atem nachweisen, wie die Studie eines internationalen Teams, an dem Forschende des Max-Planck-Instituts für Chemie beteiligt waren, jetzt zeigt. Demzufolge findet sich in der Atemluft sexuell erregter Menschen eine charakteristische Signatur flüchtiger Moleküle. Die Versuchspersonen atmeten weniger Isopren und Kohlendioxid aus, hingegen stieg die Konzentration von Stoffwechselprodukten an, die sich bestimmten Neurotransmittern, etwa dem Glückshormon Dopamin, zuordnen lassen. Das fanden die Forschenden heraus, als sie zwölf Männern und zwölf Frauen im Research Laboratory on Human Sexuality, kurz SexLab, an der Universität Porto verschiedene Filmclips zeigten, darunter einen Erotikfilm. Währenddessen maßen sie die sexuelle Erregung der Testpersonen, indem sie die Temperatur an den Genitalien bestimmten, und fahndeten in der Atemluft nach mehr als einhundert flüchtigen organischen Verbindungen. Die Forschenden hoffen, dass ihre Entdeckung hilft, sexuelle Funktionsstörungen zukünftig besser zu diagnostizieren.

[www.mpg.de/18571636](http://www.mpg.de/18571636)

# 12%

der weltweiten Landoberfläche sind von biologischen Krusten bedeckt.

Funkwellen könnten Computer, aber auch Kartenlesegeräte vor Angriffen auf ihre Hardware schützen. Wie ein Forschungsteam des Max-Planck-Instituts für Sicherheit und Privatsphäre sowie der Ruhr-Universität Bochum zeigt, erzeugt das Signal einer Antenne in einem Gerät ein charakteristisches elektromagnetisches Muster, das von einer zweiten Antenne empfangen wird. Wenn ein Angreifer das Gerät beispielsweise mit einem Draht oder mit einer Nadel anzapft, dann verändert sich das Funkwellenmuster und lässt die Manipulation auffliegen.

Bislang werden lediglich einzelne besonders wichtige Bauteile in eine verkabelte Folie verpackt, welche bei Beschädigungen ein elektrisches Signal abgibt. Wie gut die neue Funkwellen-Alarmanlage anschlägt, das hängt davon ab, wie dick der Gegenstand ist, der in ein Gerät eingeführt wird, und auch davon, an welcher Stelle und wie tief er eindringt. Eine 0,3 Millimeter dicke Nadel etwa entdeckte die Technik zuverlässig, wenn sie einen Zentimeter tief in ein Computergehäuse geschoben wurde.

[www.mpg.de/18776166](http://www.mpg.de/18776166)

Funküberwacht:  
Zwei Antennen (rosa) für elektromagnetische Signale können Hardware-Attacken auf eine Platine erkennen.

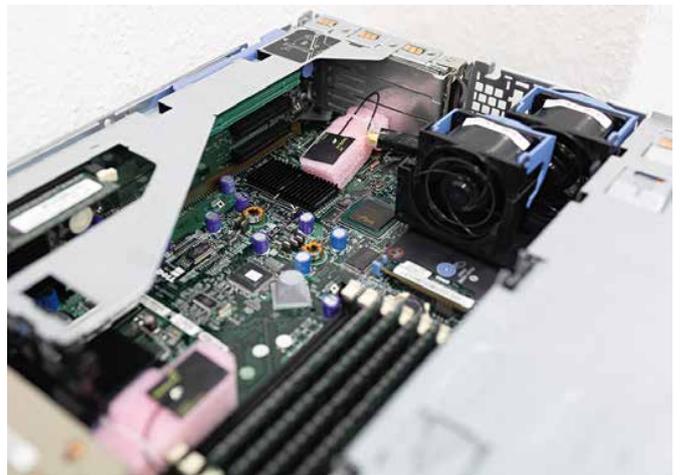


FOTO: MICHAEL SCHWETTMANN

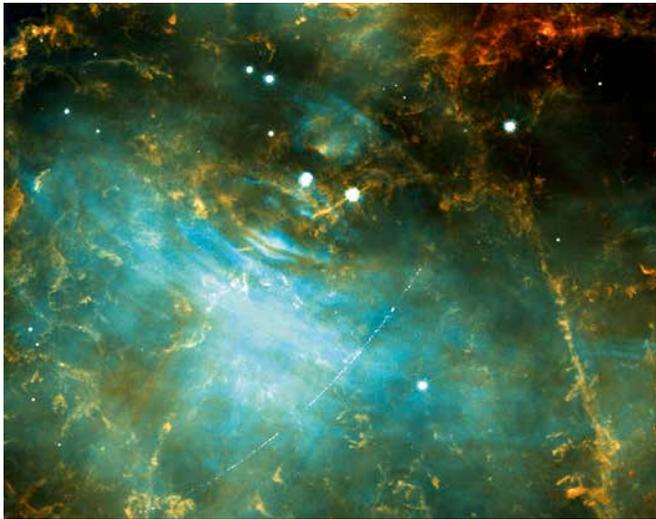
11

### HARTES LEBEN

In Trockengebieten zu leben, ist hart – und das oft buchstäblich. Denn in einem Viertel der Weltgegenden, in denen Pflanzen nur spärlich wachsen, formen Bakterien, Pilze, Moose, Flechten und Algen biologische Krusten. Diese stabilen Schichten bedecken rund 12 Prozent der weltweiten Landoberfläche, dürften sich aber durch den Klimawandel und eine veränderte Landnutzung bis zum Jahr 2070 um 25 bis 40 Prozent reduzieren. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Chemie hat nun untersucht, welche Bedeutung die Biokrusten für das Klima und die Ökosysteme haben und was ihr teilweiser Verlust bedeuten würde. Demnach stabilisieren Biokrusten die Böden gegen Erosion und reduzieren die Staubemissionen in Trockengebieten heute um etwa 60 Prozent. Durch ihren Rückgang dürfte künftig mehr Staub aufgewirbelt

werden, sodass das Klima gekühlt wird, da der Staub in der Atmosphäre Sonnenlicht reflektiert. Der zusätzliche Staub wird die Erderwärmung dabei etwa halb so stark bremsen wie die menschengemachten Staubemissionen, die vor allem von der Verbrennung fossiler Brennstoffe und Biomasse herrühren. Zudem transportiert der aufgewirbelte Staub Nährstoffe. Diese fehlen dort, wo sie weggeblasen werden, und wirken als Dünger, wo sie landen. Das kann nach Ansicht der Forschenden auch dazu führen, dass ursprüngliche Vegetation verdrängt wird. Mit dem Staub reisen darüber hinaus Mikroorganismen, die auf diese Weise neue Lebensräume besiedeln. Dadurch können sich auch Krankheitserreger verbreiten, die Pflanzen, Tieren oder dem Menschen schaden.

[www.mpg.de/18646250](http://www.mpg.de/18646250)



Kosmisches Bewegungsprofil: Auf diesem Hubble-Foto vom 5. Dezember 2005 zieht der Asteroid 2001 SE101 vor dem Krebsnebel vorbei.

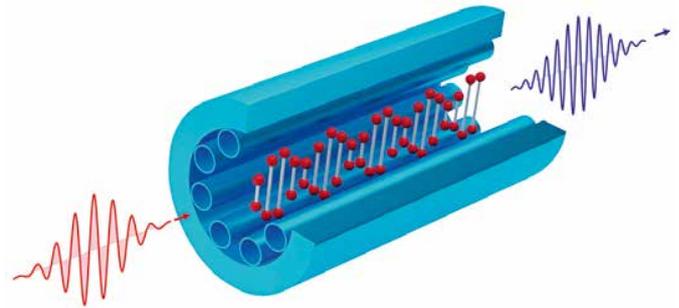
## ASTEROIDEN AUS HUBBLES ARCHIV

12

Mit einer ausgeklügelten Kombination aus menschlicher und künstlicher Intelligenz haben Forschende unter Leitung des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik jene Archivdaten durchforstet, die bei den meisten Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop Hubble automatisch als Rauschen oder Störungen herausgefiltert werden. Bei der kosmischen Detektivarbeit fahndeten rund 11 500 Freiwillige auf den Bildern nach Spuren von Asteroiden, die aufgrund der typischen Belichtungszeiten von einer halben Stunde als mehr oder weniger kurze Striche erschienen. Dabei gelangen ihnen 1488 Treffer. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nutzten diese Klassifizierungen der Laien, um einen automatisierten Algorithmus für maschinelles Lernen zu trainieren und so in den verbleibenden Archivdaten nach weiteren Asteroidenspuren zu suchen. Dies führte zu 900 zusätzlichen Entdeckungen. Nach der Bereinigung blieben insgesamt 1701 Spuren übrig. Von diesen ließen sich wiederum ein Drittel als Objekte identifizieren, die im Minor Planet Center – der größten Datenbank für Objekte des Sonnensystems – verzeichnet sind. Das Gros von 1031 Spuren stammt von kleinen Himmelskörpern, die bisher offenbar unbekannt waren.

[www.mpg.de/18601362](http://www.mpg.de/18601362)

Wasserstoffmoleküle (rot), die in einer photonischen Kristallfaser in kollektive Schwingung versetzt wurden, verändern die Frequenz und damit die Farbe eines Photons (rote und blaue Wellen). Die Verschränkung mit einem zweiten Photon bleibt dabei erhalten.



## FARBSPIEL MIT PHOTONEN

Quanteninformation könnte eine sicherere Kommunikation ermöglichen und manche Computerberechnungen beschleunigen. Doch ehe sie diese Verheißungen erfüllen kann, muss die Physik mit einem ihrer Nachteile klar kommen: Viele Quantenzustände sind extrem empfindlich, vor allem die verschränkten Zustände, bei denen sich zwei oder mehr Teilchen wie ein einziges verhalten. Verschränkung ist ein zentrales Element sowohl der Quantenkryptographie als auch des Quantencomputings. Nun hat ein Team des Max-Planck-Instituts für die Physik des Lichts einen Weg gefunden, die Farbe eines Photons von zwei verschränkten Lichtteilchen stark zu ändern, ohne die Verschränkung zu zerstören. Dies ist eine Voraussetzung, damit optische Geräte, die bei unterschiedlichen Frequenzen arbeiten, etwa in einem Quanteninternet Photo-

nen austauschen können. Um den drastischen Frequenzsprung zu erreichen, füllen die Forschenden Wasserstoffgas in den hohlen Kern einer photonischen Kristallfaser – das ist eine Glasfaser, in der feine Kanäle regelmäßig parallel zum Kern angeordnet sind und die Licht besonders verlustfrei leitet. Mit einer Methode, die stimulierte Raman-Streuung genannt wird, regen die Forschenden die Moleküle des Wasserstoffgases zu einer kollektiven Schwingung an. Wenn nun das Photon eines verschränkten Paares die im Takt schwingenden Moleküle passiert, nimmt es von diesen Energie auf. Durch die Wahl der Farbe der verschränkten Photonen, des Gases und des Drucks in der Faser können die Forschenden die Farbe, die das Photon annimmt, sehr effizient über ein breites Spektrum steuern.

[www.mpg.de/0120222en](http://www.mpg.de/0120222en)



FOTO: SHUTTERSTOCK

Nicht mehr so negativ: Unterdrückt man aktiv eine Erinnerung und ruft sie anschließend erneut ab, treten die Bilder weniger lebhaft in Erscheinung als zuvor.

## BESSER VERGESSEN

Viele Menschen machen in ihrem Leben negative Erfahrungen, an die sie möglichst nicht mehr erinnert werden möchten. Trotzdem gibt es immer wieder Momente, in denen ungewollt Erinnerungen hochkommen – oft ausgelöst durch eigentlich ganz harmlose Gegenstände: Der Gummistiefel erinnert an die Flut, der Turnschuh an den Autounfall, der Teddy an das verletzte Kind. Frühere Studien hatten jedoch herausgefunden: Schiebt eine Person die aufkommenden Bilder aktiv aus ihrem Bewusstsein, lassen sich die assoziierten Szenen später schlechter abrufen. Sie werden vergessen. Bislang war jedoch unklar,

was dabei mit der Erinnerung passiert und wie sich der Prozess im Gehirn widerspiegelt. Forschende des Max-Planck-Instituts für Kognitions- und Neurowissenschaften sind diesen Fragen in einer Studie nachgegangen. Demnach verringert sich durch das Unterdrücken einer Erinnerung die neuronale Reaktivierung von Szeneninformationen sowohl global im gesamten Gehirn als auch lokal im parahippocampalen Cortex, der eine wichtige Rolle für das Gedächtnis spielt. Durch die Kontrolle der eigenen Gedanken ist es offenbar tatsächlich möglich, die Erinnerungen dauerhaft zu schwächen. [www.mpg.de/18681838](http://www.mpg.de/18681838)

## SCHLECHTERE ABWEHR IM ALTER

Das Immunsystem muss ständig auf Angriffe von neuen Krankheitserregern reagieren und sich diese einprägen, um vor der nächsten Infektion schützen zu können. Dafür bauen die B-Zellen einen Informationsspeicher auf und produzieren eine Vielzahl von Antikörpern, die die Krankheitserreger direkt erkennen. Mit dem Altern jedoch funktioniert das Immunsystem immer schlechter – auch bei Fischen. Ein Forschungsteam vom Max-Planck-Institut für Biologie des Alterns in Köln hat herausgefunden, dass ältere Killifische andere Typen sowie eine geringere Vielfalt an Antikörpern im Blut haben als junge. Dies könnte zu einer allgemeinen Verschlechterung der Abwehrkräfte beitragen.

[www.mpg.de/18475342](http://www.mpg.de/18475342)

## FEHLEINSCHÄTZUNG SENKT IMPFQUOTE

Im Kampf gegen Corona die Impfbereitschaft erhöhen: Wie das gelingen könnte, zeigt die Studie eines internationalen Teams unter Beteiligung des Max-Planck-Instituts für Steuerrecht und Öffentliche Finanzen: Im Januar 2021 befragten die Forschenden mehrere Tausend Ärztinnen und Ärzte zu deren Haltung gegenüber der Corona-Schutzimpfung. Rund 90 Prozent gaben an, dass sie der Impfung vertrauen und planen, sich selbst impfen zu lassen. In der Bevölkerung wurde dieser Anteil dagegen weit unterschätzt: Bei Befragungen gingen etwa 50 Prozent der Laien davon aus, dass höchstens die Hälfte der Ärzteschaft der Impfung positiv ge-

genüberstehe. Diejenigen, die daraufhin über die tatsächlichen Zahlen aufgeklärt wurden, änderten nicht nur ihre Wahrnehmung der Ärztemeinung, vielmehr stieg auch die Bereitschaft, sich impfen zu lassen: Die Aufklärung senkte die Zahl der Ungeimpften um 15 bis 20 Prozent. Einen Grund für die verzerrte Wahrnehmung in der Bevölkerung sehen die Forschenden darin, dass Minderheitenmeinungen in den Medien überproportional Gewicht bekommen. In Debatten um kontroverse Themen sollte aus diesem Grund immer kommuniziert werden, wie verbreitet einzelne Ansichten sind.

[www.mpg.de/18754077](http://www.mpg.de/18754077)

FOTO: HAKAN NURAL/UNSPLASH



Vertrauenssache: Wer der Überzeugung ist, dass die Ärzteschaft der Corona-impfung vertraut, lässt sich eher impfen als diejenigen, die annehmen, dass es unter den Ärzten viele Impfskeptiker gibt.

14

## KNOCHEN, GEBAUT WIE SPANNBETON

Was Ingenieure erst vor etwa hundert Jahren erfunden haben, nutzt die Natur schon, seit es Wirbeltiere gibt. Denn so wie unter Zug stehende Stahldrähte die Rissfestigkeit von Spannbeton erhöhen, werden auch Knochen besonders hart und fest, wenn ihre Kollagenfasern durch eingelagerte mineralische Nanopartikel vorgespannt werden und sie diese Spannung auf die Partikel übertragen. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung hat nun beobachtet, dass nicht nur Hydroxylapatit, der den mineralischen Be-

standteil von Knochen bildet, in Kollagenfasern eine Vorspannung erzeugt, sondern auch andere Minerale mit anderen Kristallstrukturen eine solche Spannung verursachen. Zudem haben die Forschenden erstmals gewissermaßen live verfolgt, wie sich die Spannung im Kollagen und in den Mineralpartikeln aufbaut, wenn sich diese in den Proteinfasern einlagern. Die Erkenntnisse könnten sich unter anderem nutzen lassen, um Hybridmaterialien auf der Basis von Kollagen etwa für medizinische Anwendungen zu entwickeln.

[www.mpg.de/18548653](http://www.mpg.de/18548653)

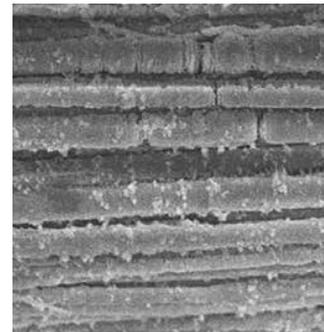


BILD: MPI FÜR KOLLOID- UND GRENZFLÄCHENFORSCHUNG

Gespannt durch Mineralpartikel: Im Rasterelektronenmikroskop ist zu erkennen, dass sich zwischen den Kollagenfasern einer Sehne Nanokristalle aus Strontiumcarbonat abgeschieden haben.

## ZAHN UM ZAHN

Wer wen frisst, hängt oftmals von der Körpergröße ab. Potenzielle Beutetiere können ihren Fressfeinden deshalb langfristig entgehen, indem sie im Laufe der Evolution größer werden – ein Weg, den beispielsweise die Wale als Schutz vor Schwertwalen und Weißen Haien eingeschlagen haben könnten. Größe bietet aber auch im Nahrungsnetz nicht immer einen Vorteil, wie ein internationales Forschungsteam unter der Leitung des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig nun zeigt. Die Forschenden haben mit der Zinkisotopenanalyse den Speiseplan des Weißen Hais mit dem des Megalodon (*Otodus megalodon*) verglichen. Dieser Megazahnhai lebte vor 23 bis 3,6 Millionen Jahren und erreichte eine Länge von bis zu zwanzig Metern. Demnach haben sich die Position des Megalodon und des mit sechs Metern Länge viel kleineren Weißen Hais innerhalb des Nahrungsnetzes überschritten. Als vor etwa fünf Millionen Jahren die ersten Weißen Haie entstanden, müssen beide Arten folglich häufig dieselbe Beute gejagt haben – und das, obwohl der Megalodon mehr als dreimal so groß war. Der Befund unterstützt die Theorie, dass der Weiße Hai ein Nahrungskonkurrent des Megalodon war und so dazu beigetragen haben könnte, dass der Riesenzahnhai ausstarb.

[www.mpg.de/18716557](http://www.mpg.de/18716557)



FOTO: LIRAN SAMUNI, TAI CHIMPANZEE PROJECT

Kommunikation bei Schimpansen: Die Forschenden identifizierten Hunderte von verschiedenen Lautsequenzen, die nach bestimmten Regeln aufeinanderfolgen.

## IN GANZEN SÄTZEN, BITTE

Die Gabe, Wörter nach bestimmten Regeln zu kombinieren, gilt als Alleinstellungsmerkmal der menschlichen Sprache. Forschende der Max-Planck-Institute für evolutionäre Anthropologie und für Kognitions- und Neurowissenschaften haben nun Hinweise gefunden, woher diese außergewöhnliche Fähigkeit stammt. Sie untersuchten die Lautkommunikation von Menschenaffen und zeichneten im Tai-Nationalpark in der Elfenbeinküste Tausende Lautäußerungen frei lebender Schimpansen auf. Wie sich herausstellte, produzieren die Tiere Hunderte von verschiedenen Lautsequenzen, die aus bis zu zehn unterschiedlichen Rufen bestehen. Die Reihenfolge dieser Rufe folgt bestimmten Regeln. Damit ist die vokale Kommunikation unter Schimpansen wesentlich komplexer und strukturierter als bisher angenommen. Als Nächstes wollen die Forschenden untersuchen, ob Ähnlichkeiten zu Strukturen menschlicher Sprache bestehen und ob Schimpansen diese Sequenzen nutzen, um eine größere Bandbreite an Themen zu kommunizieren.

[www.mpg.de/18656324](http://www.mpg.de/18656324)

Deutlicher Unterschied: Zahn eines ausgestorbenen Riesenzahnhaies Megalodon (links) und eines Weißen Hais (rechts). Die Zusammensetzung unterschiedlicher Zinkisotopen in der Schmelzkronen der Zähne verrät Forschenden, wovon sich die Tiere ernährt haben.

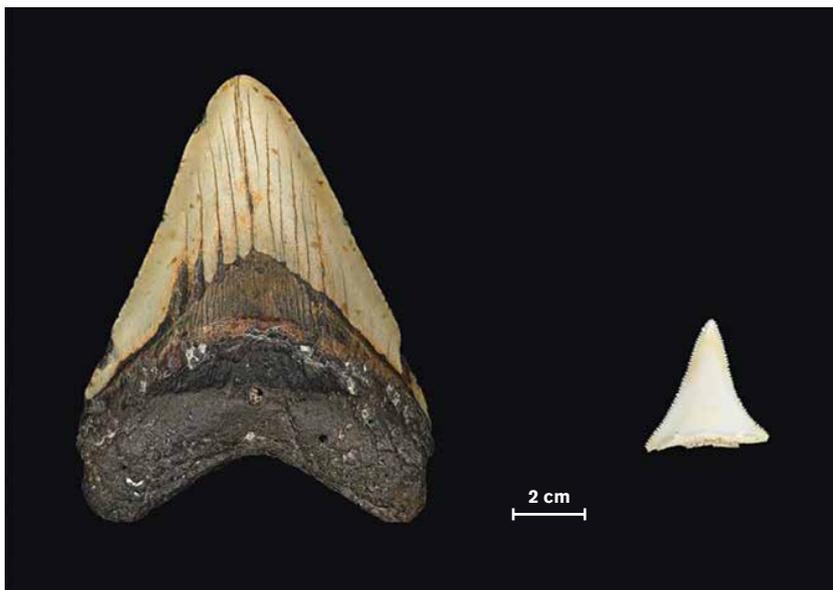


BILD: MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

---

# FLÜCHTLINGSHILFE PRAGMATISCH DENKEN

Europa erlebt gerade die größte Fluchtbewegung seit dem Zweiten Weltkrieg. Doch anders als 2015, als zahlreiche Menschen aus Syrien und Afghanistan in Europa Schutz suchten, gibt es derzeit keine Forderungen, die Geflüchteten an der Grenze zurückzuweisen. Inwieweit unterscheidet sich die Situation heute von der damaligen? Und was können wir für die Zukunft daraus lernen? Diesen Fragen geht unsere Autorin Dana Schmalz nach.

16

Unmittelbar nachdem im Februar 2022 der russische Angriffskrieg in der Ukraine begonnen hatte, begannen zahlreiche Ukrainerinnen und Ukrainer zu fliehen und in den europäischen Nachbarstaaten anzukommen. Inzwischen (Stand Anfang Juni) ist die Rede von mehr als sechs Millionen Menschen, die aus der Ukraine geflohen sind, mehr noch sind innerhalb des Landes geflohen. In mehrfacher Hinsicht unterscheidet sich die Aufnahme ukrainischer Flüchtlinge in der Europäischen Union von jener anderer Flüchtlingsgruppen. Um diese Unterschiede und um eine Einordnung in generellen Fragen des Flüchtlingsrechts geht es mir hier.

Schon im Ausgangspunkt besteht ein rechtlicher und praktischer Unterschied hinsichtlich der Einreise: Ukrainische Staatsbürger verfügen über bis zu neunzig Tage Visafreiheit im Schengenraum, insofern genügt generell ein Reisepass für den Grenzübertritt. Es müssen Versorgung und längerfristige Aufnahme organisiert werden, aber anders als für Asylsuchende sonst ist der Grenzübertritt als solcher unproblematisch. Das steht in deutlichem Kontrast zu den sonst vehementen Auseinandersetzungen um Einreise und Zurückweisungen. Teilweise finden klar rechtswidrige Zurückweisungen von Geflüchteten aus anderen Ländern statt,

→

# ZUR SACHE

---

DANA  
SCHMALZ



Dana Schmalz schreibt regelmäßig zu aktuellen Entwicklungen im europäischen Grenzregime und befasst sich besonders mit Fragen im Schnittpunkt von internationalem Recht und Rechtstheorie. Sie wurde an der Universität Frankfurt promoviert und ist nach mehreren Aufenthalten in New York nun Referentin am Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht in Heidelberg. Seit Oktober 2021 vertritt sie außerdem die Professur für Internationales Recht an der Universität Jena. Ihr Buch *Refugees, Democracy and the Law. Political Rights at the Margins of the State* ist 2020 bei Routledge erschienen.

17

---

## DAS GEMEINSAME EUROPÄISCHE ASYLSYSTEM STECKT SEIT JAHREN IN DER KRISE

beispielsweise in der Ägäis. Teilweise wird um Rechtmäßigkeit gestritten, so in Bezug auf die neuere Rechtsprechung des Europäischen Gerichtshofs für Menschenrechte zum Verbot der Kollektivausweisungen, in der der Gerichtshof eine überraschend enge Auslegung wählte.

In den Fällen ging es um Pushbacks nach Marokko in der Grenzzone der spanischen Enklave Melilla sowie um kollektive Zurückweisungen an der Grenze zwischen Nordmazedonien und Griechenland.

Darüber hinaus herrscht weitreichende Einhelligkeit über das Ziel, die aus der Ukraine Fliehenden schnell aufzunehmen und zu unterstützen. Die direkten Nachbarstaaten – Polen, die Slowakei und Rumänien als EU-Staaten sowie Moldawien – zeigten sich großzügig und erlaubten die Einreise auch für Personen, die keinen Reisepass vorlegen konnten. Innerhalb weniger Tage bildeten sich zivilgesellschaftliche Initiativen, die neben den staatlichen Maßnahmen Unterkünfte und materielle Unterstützung organisierten. Nicht die zivilgesellschaftlichen Initiativen waren außergewöhnlich, jedoch die politische Einigkeit und das Zusammenspiel von Engagement und staatlichen Strukturen. Das Gemeinsame Europäische Asylsystem steckt ansonsten seit Jahren in der Krise, besonders die Verantwortungsteilung zwischen den Mitgliedstaaten des Dublin-Systems ist dauerhaft umstritten, und Reformbemühungen sind bislang gescheitert.

Im Gegensatz dazu gestaltet sich die Aufnahme von Menschen aus der Ukraine pragmatisch. Die Mitgliedstaaten der Europäischen Union aktivierten – erstmals überhaupt – die Massenzustromsrichtlinie (auch: Richtlinie über vorübergehenden Schutz). Sie sieht vor, dass Flüchtlinge nach ihrer Registrierung ein Aufenthaltsrecht von zwölf Monaten erhalten, welches auf insgesamt bis zu drei Jahre verlängert werden kann. Sie haben eine Arbeitserlaubnis und erhalten finanzielle Unterstützung sowie eine Unterkunft. Der vorübergehende Schutzstatus schließt nicht das Recht aus, einen Asylantrag zu stellen, bietet zugleich aber Zugang zu Rechten ohne das langwierige und unsichere Asylverfahren.

Mitgliedstaaten haben Gestaltungsspielraum in der Anwendung der Richtlinie, und manche Fragen – etwa nach dem Umgang mit Asylanträgen, nach Dauer des Schutzes oder nach von dem Schutz umfassten Personen – mögen auch noch zu Diskussionen führen. Dennoch lässt sich ohne Zweifel bereits festhalten, dass sich die Aufnahme ukrainischer Flüchtlinge deutlich unterscheidet von der Aufnahme syrischer, afghanischer oder eritreischer Flüchtlinge in den vergangenen Jahren. Das hat, wie gesehen, rechtliche Gründe: die genannte Visafreiheit sowie die Tatsache, dass ukrainische Flüchtlinge direkt in europäische Staaten fliehen können, während viele sonstige Schutzsuchende – auch aufgrund der Unmöglichkeit,

## ES IST GUT, WENN WIR DIE UNTERSCHIED- LICHE WAHR- NEHMUNG VON FLUCHT DISKUTIEREN

einen Flug zu nehmen – über andere Staaten kommen. Die sogenannten *carrier sanctions*, mit denen Fluggesellschaften angehalten werden, Personen ohne Visum nicht zu befördern, machen eine Einreise auf diesem Weg für Asylsuchende unmöglich.

Der Umgang mit aus der Ukraine Geflüchteten spiegelt aber auch politische Entscheidungen und eine gesellschaftliche Stimmung wieder. Über deren Legitimität gibt es Diskussionen: Ist die höhere Bereitschaft zur Aufnahme auf die politischen Umstände des Krieges in der Ukraine zurückzuführen? Ist geografische Nähe ausschlaggebend? Spielt ein Gefühl der kulturellen Ähnlichkeit eine Rolle? Oder spiegelt diese unterschiedliche Behandlung die Rolle von Rassismus bei der Wahrnehmung von Kriegen und bei der Haltung gegenüber Flüchtlingen, wie einige Beiträge kritisieren?

Zunächst: Die Frage, ob unterschiedlicher Umgang legitim ist, ist zu unterscheiden von einzelnen Vorfällen direkter Diskriminierung an den Grenzen. So gab es Berichte, dass Studierende aus afrikanischen Staaten bei der Flucht aus der Ukraine teilweise an der Grenze nach Polen festgehalten wurden. Dass das inakzeptabel ist, steht außer Frage. Das ergibt sich aus der schlichten Anwendung geltenden Rechts. Daneben enthält auch die Genfer Flüchtlingskonvention ein ausdrückliches Diskriminierungsverbot.

Zum Umfang des Schutzes unter der Massenzustromsrichtlinie treffen Mitgliedstaaten spezifische Regelungen. In Deutschland wurde diesbezüglich beschlossen, dass nur ukrainische Staatsangehörige schutzberechtigt sind, die vor dem 24. Februar 2022 ihren Aufenthalt in der Ukraine hatten, sowie Drittstaatsangehörige, die in der Ukraine internationalen Schutz genossen oder sonst nicht in ihre Heimatstaaten zurückkehren können. Andere Personen, die zuvor in der Ukraine lebten, aber die Möglichkeit haben, in ihre Heimatstaaten zurückzukehren, erhalten zumindest unter der Massenzustromsrichtlinie in Deutschland keinen Schutz. Das kann man politisch falsch finden, es stellt aber als solches keine Diskriminierung dar, da nicht Gleiches ungleich behandelt wird, sondern unterschiedliche Situationen unterschiedlich. Unterschiedlich sind die Situationen daher, weil Drittstaatsangehörigen eine andere Zuflucht – ihr Heimatstaat – zugänglich ist.

Dass die Aufnahme geflüchteter Ukrainer politisch in viel höherem Maße befürwortet wird, lässt sich nun erst mal nicht rechtswissenschaftlich bewerten. Wohl aber kann das Anlass sein zu unterstreichen, dass auch über rechtliche Kriterien implizit die Reichweite von Verantwortung verhandelt wird. Diese Abhängigkeit von Vorverständnissen wurde beispielsweise in einem Fall zu humanitären Visa deutlich, in dem der Europäische

→

---

Gerichtshof für Menschenrechte das Kriterium der Hoheitsgewalt nach Artikel 1 der Europäischen Menschenrechtskonvention auszulegen hatte. Es ging darum, ob die Konvention auf eine Visumsentscheidung überhaupt anwendbar ist, ob also die Folgen der Ausstellung oder Verweigerung eines Visums in ihren menschenrechtlichen Implikationen zu prüfen sind. Das Gericht verneinte dies. Eine solche Auslegung orientiert sich an Wortlaut, Kontext, Plausibilität und vorheriger Rechtsprechung – aber dahinter stehen immer auch Vorstellungen über Nähe und Verantwortung. Insofern ist es gut, wenn nun eine öffentliche Debatte über die unterschiedliche Wahrnehmung von Krieg und Flucht geführt wird und dabei Annahmen, gegenüber wem flüchtlings- und menschenrechtliche Pflichten bestehen, reflektiert werden. Anstatt die aktuelle Aufnahmebereitschaft zu relativieren, kann das ein Ausgangspunkt für weitergehende Empathie und Engagement sein. Ein solch konkreter Universalismus nimmt besondere Verbindungen und die Rolle von Nähe ernst, er blickt aber zugleich darüber hinaus.

Denken wir nun darüber nach, was sich aus dem Umgang mit ukrainischen Flüchtlingen für das europäische Asylsystem allgemeiner lernen lässt, dann verdienen zwei Punkte Erwähnung: erstens die Rolle individueller Verfahren, zweitens die Zuständigkeitsverteilung und Bewegungsfreiheit in der Europäischen Union.

Die Aufnahme unter der Massenzustromsrichtlinie bedeutet eine zeitweise Abkehr vom individuellen Verfahren. Die Geschichte des Flüchtlingsschutzes durchzieht ein Wechsel zwischen Perspektiven auf Gruppen und auf Einzelne. Während der Schutz politisch Verfolgter stark an individuellen Fällen orientiert war, richtete sich Flüchtlingsschutz zunächst vor allem auf Gruppen; bis zur Genfer Flüchtlingskonvention von 1951 gab es keine abstrakte Definition des Flüchtlings, sondern Aufnahme wurde situativ anhand von Gruppen koordiniert. Einerseits sind individuelle Verfahren eine wesentliche Errungenschaft: Nur so lässt sich sicherstellen, dass tatsächlich Rechte jedes und jeder Einzelnen gewahrt werden. Insofern sind Tendenzen zur Abkehr von individuellen Verfahren problematisch, beispielsweise durch verstärktes *screening* – also Grob-betrachtungen anhand von Nationalität, wie die Reformentwürfe zum Gemeinsamen Europäischen Asylsystem es vorschlagen. Andererseits kann der Fokus auf individuelle Verfahren und das Idealbild des individuell Verfolgten dazu führen, dass umgekehrt Gruppenbewegungen als außergewöhnlich und geradezu „katastrophal“ wahrgenommen werden. Die Vorstellung von Migration als gänzlich individuell widerspricht der Wirklichkeit von Fluchtbewegungen, die oft Gruppen umfassen, in der Vergangenheit ebenso wie heute. Insofern bedarf es des Bewusstseins dafür, dass individuelle Rechte

URSPRÜNGLICH  
RICHTETE  
SICH FLÜCHT-  
LINGSSCHUTZ  
VOR ALLEM  
AUF GRUPPEN

## DIE ERFAHRUNG ZEIGT, DASS SICH DIE INTERESSEN VON SCHUTZSUCHENDEN UND STAATEN OFT ENTSPRECHEN

und kollektive Migration nebeneinander bestehen. Die Massenzustromsrichtlinie bietet ein Beispiel für ein pragmatisches Verzicht auf langwierige Einzelverfahren, ohne den Weg zu einer individuellen Prüfung zu verstellen.

Ein weiterer bemerkenswerter Aspekt bei der Anwendung der Massenzustromsrichtlinie ist, dass kein übergeordnetes Zuständigkeitsystem besteht. Die Verteilung von Schutzberechtigten in der EU richtet sich nach deren Registrierung. Da ukrainische Staatsbürgerinnen und Staatsbürger sich visafrei in der EU bewegen dürfen, hängen von ihrer Wahl der Ort der Registrierung und folglich die Zuständigkeit ab. Der

Kontrast zu den Debatten um Verantwortungsteilung im Gemeinsamen Europäischen Asylsystem könnte nicht größer sein: Dort bestehen besonders hinsichtlich der Zuständigkeitsfrage starke Oppositionen. Die Dublin-Verordnung sieht meist eine Zuständigkeit des Staats der ersten Einreise in die EU vor; die Staaten an den EU-Außengrenzen betrachten diese Verteilung als ungerecht. Manche Binnenstaaten wie Deutschland wiederum sind faktisch Ziel vieler Asylsuchenden; sie behandeln Sekundärmigration in der EU als erhebliches Problem. Während sich also viele Asylsuchende in der EU verteilen, gibt es erheblichen Widerstand gegen ein Modell freier Wahl. Die jetzige Anwendung der Massenzustromsrichtlinie bietet nun eine erste Erfahrung mit genau solch einem Modell – und dies funktioniert bisher ohne große Schwierigkeiten.

Dabei bleibt abzuwarten, ob die Zuständigkeit für Schutzberechtigte unter der Massenzustromsrichtlinie in den kommenden Monaten und Jahren noch stärker zum Streitpunkt wird. Die Richtlinie erwähnt in Erwägungsgrund 20 die Verantwortungsteilung und spricht von einem „Solidaritätsmechanismus, [der] geschaffen werden [soll]“. Deutschland hatte bereits auf eine Verteilung nach Quoten gedrängt, die Kommission wandte sich dagegen. Stattdessen besteht eine Solidaritätsplattform, die Informationen bündelt und Ressourcen wie medizinische Versorgung oder Wohnraum koordiniert. In jedem Fall lässt sich an der jetzigen Selbstverteilung beobachten, wie ein solches System funktionieren kann und was Faktoren bei der Wahl sind: vor allem geografische Nähe zum Herkunftsstaat sowie Familien- und sonstige Kontakte.

Es zeigt, dass sich die Interessen von Schutzsuchenden und Staaten oft entsprechen: Es geht um Perspektiven der Integration, der sozialen Einbindung und des Arbeitsmarktzugangs. Eigentlich ein positives Bild, wenn es um die Gestaltung im Europäischen Asylsystem geht: Vieles ist möglich, wenn Migration nicht als Gefahr behandelt, sondern Aufnahme pragmatisch gestaltet wird.

# WINDKRAFT, ABER RICHTIG

Damit Deutschland bis zur Mitte des Jahrhunderts klimaneutral ist, sollen regenerative Quellen viel mehr Strom liefern als die heute insgesamt produzierten rund 500 Terawattstunden. Denn dann müssen auch die fossilen Energieträger, die heute noch für die Wärmegegewinnung, im Verkehr und in der Industrie-

produktion eingesetzt werden, mithilfe von Strom ersetzt werden. Neben der Frage, wo Fotovoltaik- und Windkraftanlagen gebaut werden dürfen, sollte der Ausbau auch berücksichtigen, welche Leistung die verschiedenen regenerativen Energieformen erbringen können – speziell die Windkraft.

## WAS DIE ERNEUERBAREN LEISTEN KÖNNEN

### Potenzielle Stromleistung

der Erneuerbaren in Deutschland

**8600 GW**

Fotovoltaik

**390 GW**

Wind

**260 GW**

Biomasse

**15 GW**

Geothermie

**5 GW**

Wasser

### Energiebedarf

2021

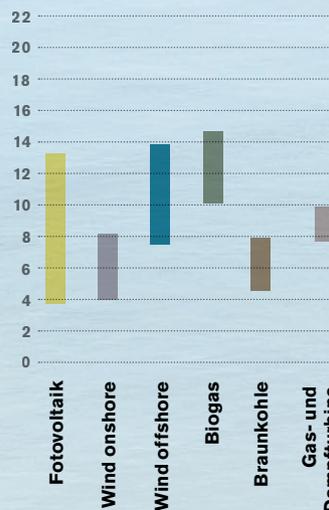
**3390 TWh/Jahr = 387 GW**

davon rund 80 Prozent importiert

Um für Deutschlands gesamten Energiebedarf die Leistung von 387 Gigawatt zu erbringen, müssten heutige Fotovoltaikanlagen rund 4,5 Prozent des Bundesgebiets bedecken. Windkraftanlagen könnten in ganz Deutschland maximal 390 Gigawatt leisten. Schon heute liefern Windkraft und Fotovoltaik Strom oft kostengünstiger als Braunkohle.

### Kosten (€-Cent / kWh)

2018

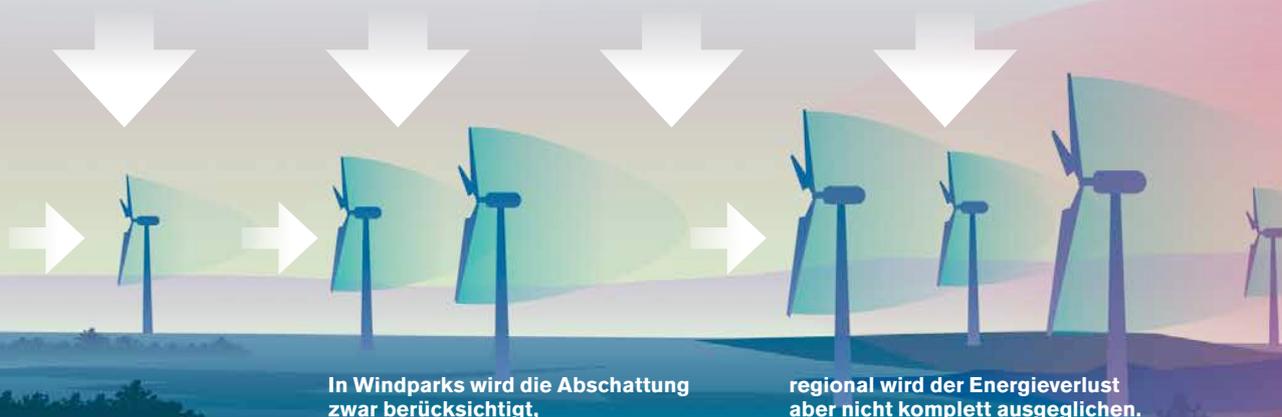


## VIELE TURBINEN SCHWÄCHEN DEN WIND

Da Turbinen dem Wind Energie entziehen und einen Wind-schatten erzeugen, werden sie meist in einem Abstand von vier bis sechs Rotordurchmessern, also etwa 600 bis 800 Metern, errichtet. Dann kann die Energie von oben nachgeliefert werden. Das gilt jedoch nur begrenzt: Je mehr Windräder in einer Region

stehen, desto weniger kann die Atmosphäre die Verluste ausgleichen – der Wind wird schwächer. Dieser Effekt dürfte beim geplanten Ausbau an Land in einigen Regionen den Stromertrag reduzieren und wird eine große Rolle für den angestrebten Ausbau in der Nordsee spielen.

### Windenergie wird von oben nachgeliefert



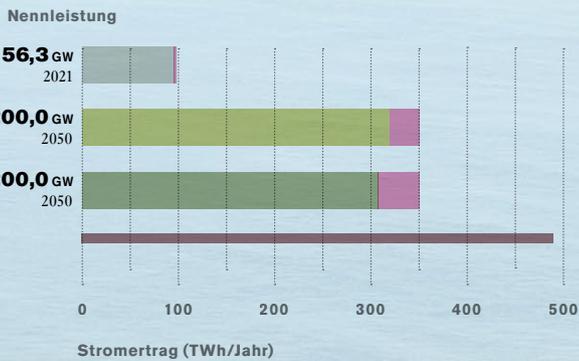
## WINDKRAFT BRAUCHT PLATZ

Im Jahr 2021 waren an Land Windkraftanlagen mit 56 Gigawatt Nennleistung installiert, 2050 könnten es 200 Gigawatt sein. Wie Forschende des Max-Planck-Instituts für Biogeochemie berechnet haben, wird der Stromertrag durch Entzug von Windenergie um 8 Prozent reduziert, wenn die Anlagen proportional zur Landesfläche

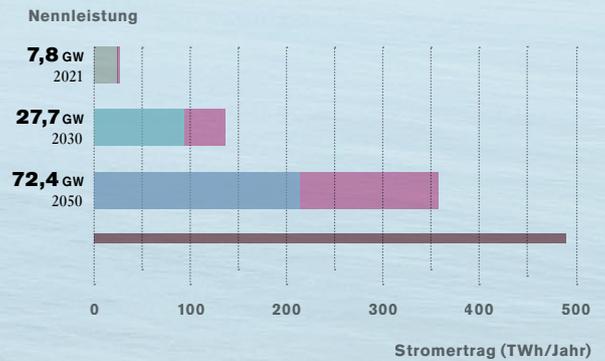
(Szenario **A**) verteilt werden. Dann würden besonders viele neue Anlagen in den südlichen Bundesländern entstehen. Wenn Turbinen proportional zu den heute vorhandenen Anlagen (Szenario **B**) errichtet werden, also vor allem in den nördlichen Bundesländern, sinkt der Ertrag um gut 10 Prozent. Das Gebiet, das in der Nordsee

für Windkraftanlagen zur Verfügung steht, ist viel kleiner als die Landfläche Deutschlands. Dort soll bis 2050 mit 70 Gigawatt aber ein Drittel der an Land angestrebten Leistung installiert werden. Daher ist dort mit einer Ertragsreduktion von 40 Prozent zu rechnen. Das würde die Kosten der Stromerzeugung dort deutlich erhöhen.

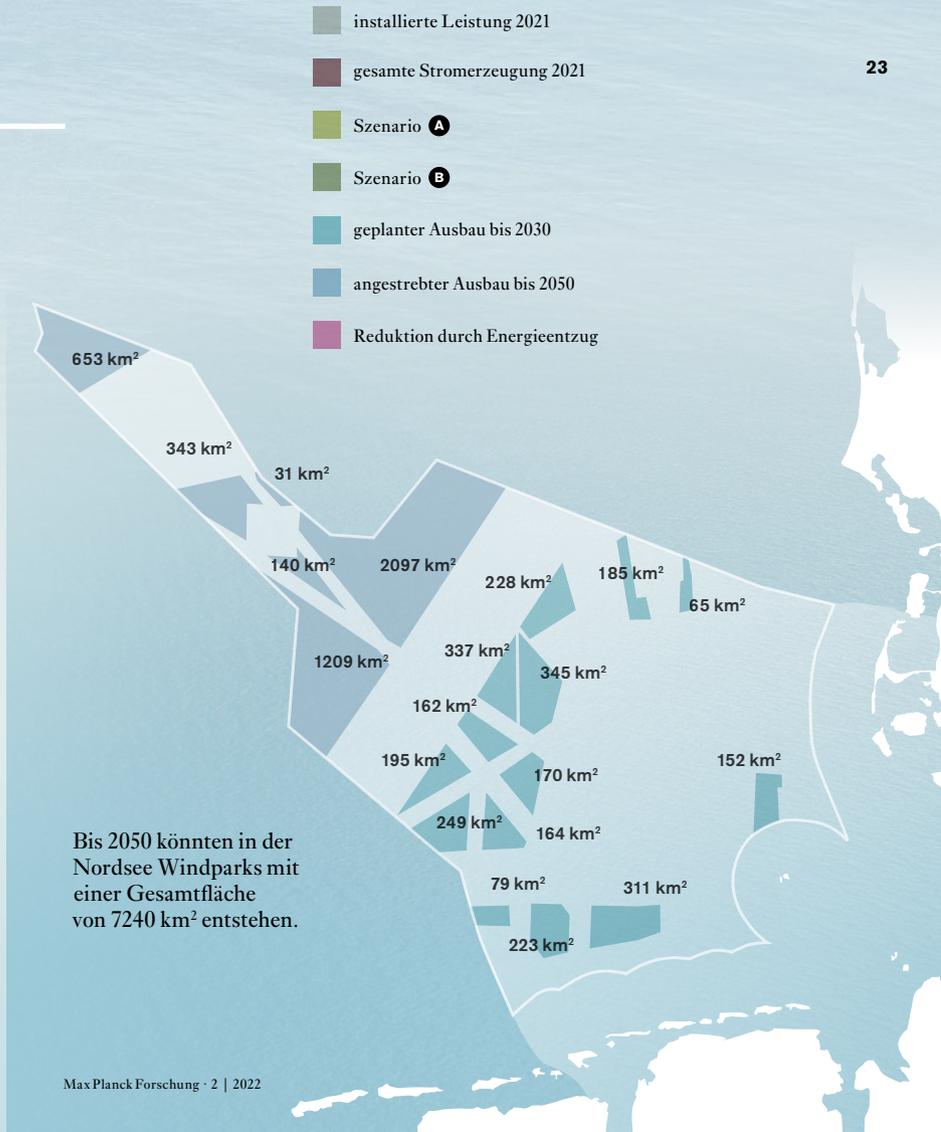
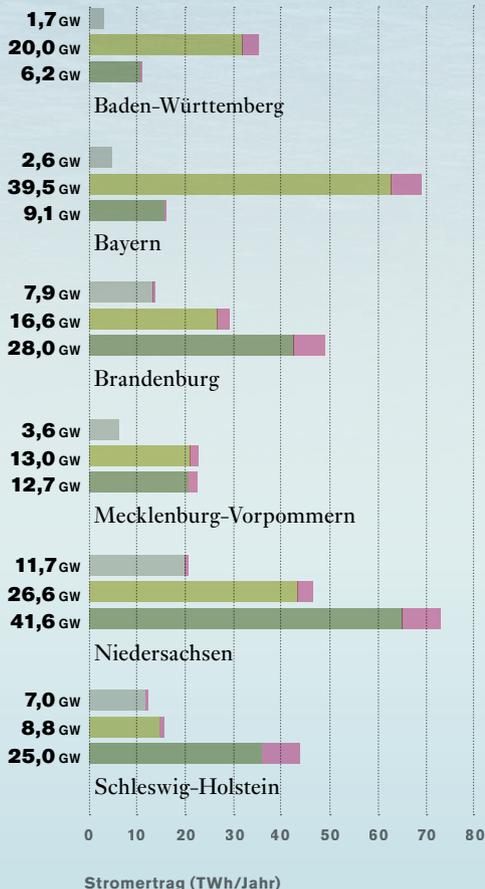
### Stromertrag an Land



### Stromertrag auf See



### Nördliche und südliche Bundesländer



# IM FOKUS

---

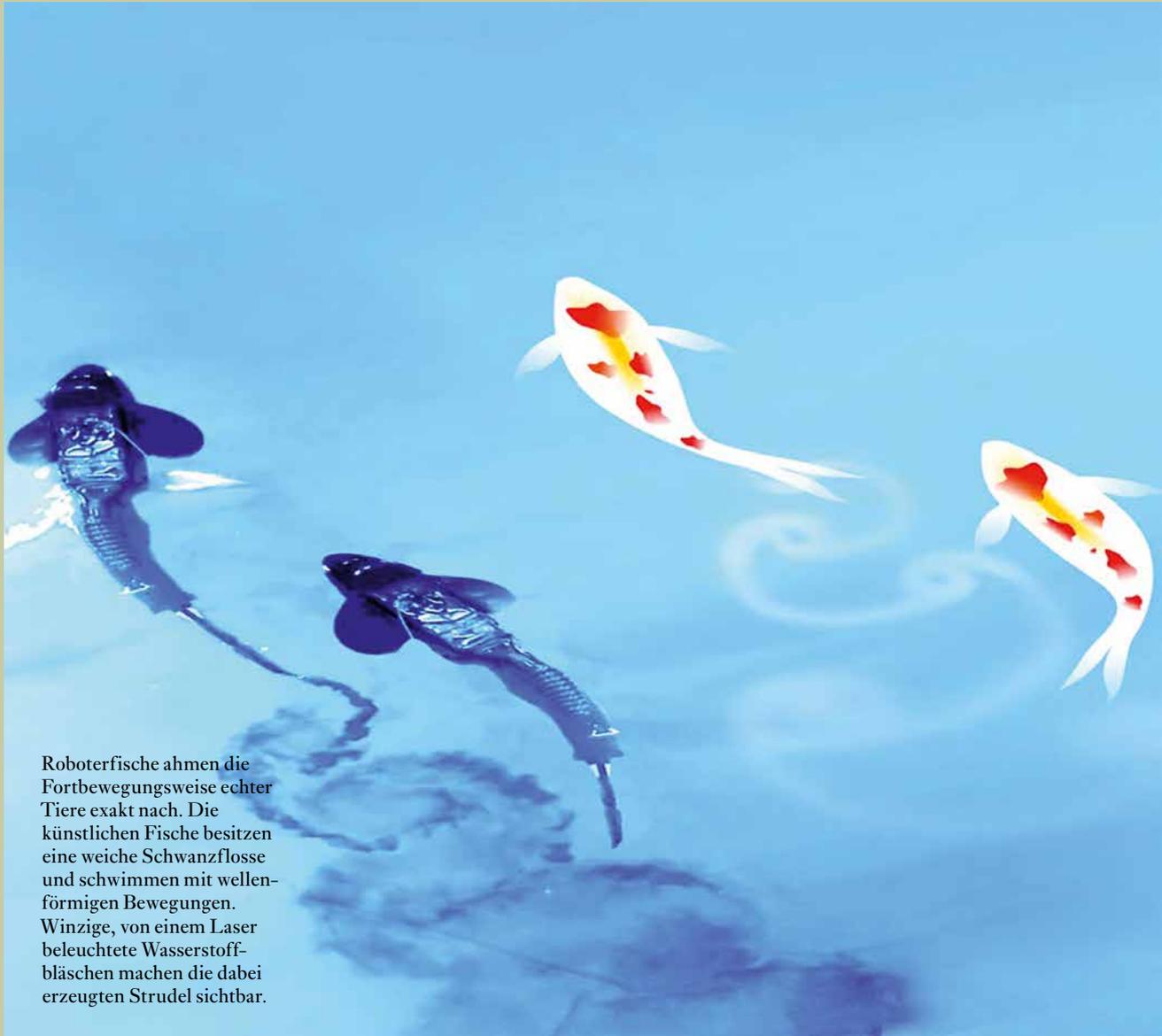
## GEREGELTES DURCHEINANDER

**24** | Wirbel im Schwarm

**32** | Neun pro Quadratmeter

**40** | Lockstoffe für das Kollektiv

FOTO: LIANG LI / MPI FÜR VERHALTENSBIOLOGIE



Roboterfische ahmen die Fortbewegungsweise echter Tiere exakt nach. Die künstlichen Fische besitzen eine weiche Schwanzflosse und schwimmen mit wellenförmigen Bewegungen. Winzige, von einem Laser beleuchtete Wasserstoffbläschen machen die dabei erzeugten Strudel sichtbar.

# WIRBEL IM SCHWARM

*TEXT: HARALD RÖSCH*

Iain Couzin, Forscher am Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie in Konstanz, und sein Team wollen wissen, welchen Regeln Fische im Schwarm folgen und welche Vorteile das Leben im Kollektiv bietet. Modernste Technik hilft den Forschenden dabei, Ordnung im großen Durcheinander zu finden.



Im Labor von Iain Couzin schwimmen Moderlieschen in mehrere Tausend Liter fassenden Becken. Das menschliche Auge kann einen einzelnen Fisch in dem dichten Gewusel hin und her flitzender Fischleiber kaum länger als einige Sekunden verfolgen. Aber dank moderner Hochleistungskameras, dank automatischer Bildverfolgung und Bewegungsanalyse können die Forschenden um Iain Couzin trotzdem jeden Fisch beobachten. Das Durcheinander innerhalb eines Fischschwarms verwirrt nicht nur das menschliche Auge. Auch Angreifern fällt es schwer, sich auf ein bestimmtes Tier zu konzentrieren. Solch ein Schwarm ist zwar einfacher zu entdecken als ein einzelner Fisch und macht Feinde daher leichter auf sich aufmerksam, aber die schiere Menge an Fischen bietet Sicherheit.

## Mehr sehen, riechen, fühlen

Schutz ist einer der Gründe, warum Fische in oft riesigen Schwärmen durch die Ozeane ziehen. Der Schwarm verwirrt Angreifer aber nicht nur, er reagiert auch schneller als diese, denn Tausende von Augen, Nasen

und Drucksensoren sehen, riechen und fühlen mehr! Der erste Fisch des Schwarms, der einen Räuber wahrnimmt, alarmiert die Nachbarn durch seine Fluchtbewegung und löst so eine Kettenreaktion aus. Die Information verbreitet sich blitzschnell: Dank des Informationsvorsprungs kann ein Schwarm bis zu 15-mal schneller auf einen Angriff reagieren als ein Individuum. Große Raubfische wollen das verhindern. Die Forschenden haben entdeckt, dass manche dieser Tiere bei ihren Attacken in einer Reihe hintereinander in den Schwarm schwimmen, um diesen zu teilen. In den Kleingruppen ist dann leichter Beute zu machen.

Das Schwarmleben hilft zudem, lokale Unterschiede oder allmähliche Veränderungen des Salzgehalts, des Lichts oder der Temperatur wahrzunehmen. Durch das Leben in Gruppen erlangt der Schwarm kollektives Wissen über seine Umwelt und kann auf diese reagieren – Wissen, das ein Einzeltier nicht hat. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben darüber hinaus entdeckt, dass ein Fisch im Schwarm weniger Bewegungsenergie benötigt als ein einzeln schwimmendes Tier. Der Grund: Die Energie aus



In guter Gesellschaft: An Moderlieschen lässt sich hervorragend untersuchen, welche Vorteile das Leben im Schwarm bietet. Die rund zehn Zentimeter langen Fische leben zumeist in stehenden oder schwach fließenden Gewässern – etwa in Teichen, Baggerseen oder sumpfigen Gräben.

**„Ein Schwarm kann sich an Dinge erinnern, die ein bestimmtes Tier unter Umständen gar nicht selbst erlebt hat.“**

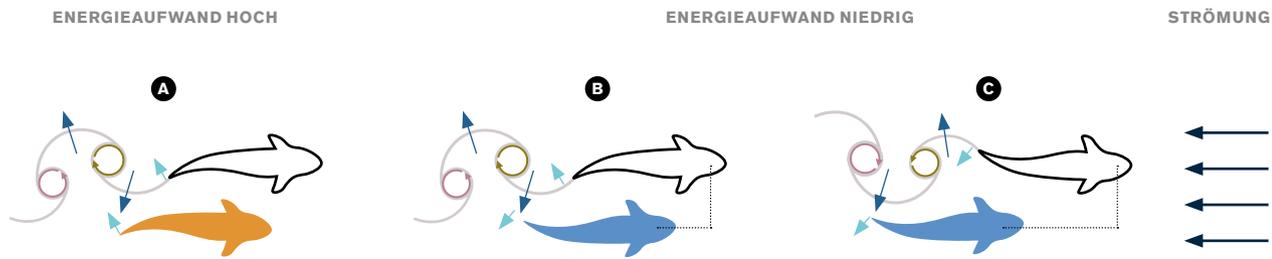
IAN COUZIN

Wasserwirbeln von den Flossenschlägen seiner Nachbarn machen das gemeinsame Schwimmen effizienter. Forschende hatten dies schon seit Langem vermutet, doch Couzin und sein Team lieferten 2020 erstmals den Beleg. Sie haben dazu künstliche Fische entwickelt und deren Energieverbrauch beim gemeinsamen Schwimmen in einem Gegenstrombecken gemessen. Durch winzige, unter Laserlicht aufleuchtende Wasserstoffbläschen wurden die Wirbel sichtbar, die jeder Fisch beim Schwimmen erzeugt und die sich nach hinten ausbreiten. Das Geheimnis des Energiesparens liegt in der Synchronisation des Flossenschlags: „Der hinten schwimmende Fisch muss den Schlag seiner Schwanzflosse auf den des voranschwimmenden Tieres abstimmen. Dabei gibt es – je nach Abstand zum Vordermann – einen optimalen Phasenversatz. Schwimmen die Roboterfische zum Beispiel nebeneinander, dann sollten ihre Schwanzflossen idealerweise synchron schlagen“, erklärt Couzin.

Aber verhalten sich auch echte Fische so? Die Forschenden entwickelten ein hydrodynamisches Modell, das genau vorhersagt, was zum Beispiel zwei zusammen schwimmende Fische tun sollten. Und tatsächlich, die Tiere schwimmen genau so, dass sie die Wirbel des Partners optimal ausnutzen. Rund fünf Prozent seiner Schwimmenergie kann ein Fisch auf diese Weise sparen. „Das ist enorm, wenn man bedenkt, dass die Fortbewegung einen großen Teil der Energie eines Fisches erfordert“, so Couzin. Aber nicht nur das: Falls notwendig, können die Tiere sich auch entscheiden, nicht Energie zu sparen, sondern die Energie der Wirbel zu nutzen, um ihren Schub zu erhöhen. Der hintere Fisch kann dadurch schneller beschleunigen. Zu klein darf ein Fisch allerdings nicht sein, will er energetisch noch von seinen Nachbarn profitieren. Für sehr kleine Fische ist die Viskosität des Wassers – also seine Zähflüssigkeit – zu hoch. „Das Wasser ist für sie wie Honig – darin können sie keine dauerhaften Wirbel erzeugen.“

Mit den heute zur Verfügung stehenden Techniken lässt sich bislang nur das Wechselspiel zweier Individuen analysieren. Sobald ein Dritter hinzukommt, wird es extrem kompliziert – von einem Schwarm ganz zu schweigen. Deshalb ist es auch noch nicht klar, wie sich effizientes Schwimmen und Abwehrverhalten gegenüber Räubern gegenseitig beeinflussen. Überwiegt eines von beidem, oder gehen Fische einen Kompromiss zwischen beiden Anforderungen ein? Das Verhalten von Tieren in einem Schwarm wirkt so perfekt abgestimmt, dass man unwillkürlich höchst komplizierte Regeln vermutet, die den Schwarm zusammenhalten. Couzin und sein Team haben mit diesem Irrtum aufgeräumt. „Schwarmtiere folgen verhältnismäßig einfachen und effektiven Regeln, sie müssen gar nicht aktiv miteinander Informationen austauschen. Es reicht, auf die Bewegungen der Nachbarn zu reagieren.“ Sehr nah beieinander schwimmende Fische stoßen sich also





Zeigen die Kraftpfeile von Schwimmbewegungen (hellblau) und Wirbeln (dunkelblau) in verschiedene Richtungen, kostet das gemeinsame Schwimmen mehr Energie (A). Um Energie zu sparen, muss ein Fisch seine Bewegungen deshalb so mit denen des vorausschwimmenden Tieres synchronisieren, dass dessen Wirbel seine eigenen Bewegungen unterstützen (B). Bei größerem Abstand muss die Schwanzflosse stärker zeitlich versetzt schlagen (C).

GRAFIK: LI, L.; NAGY, M.; GRAVING, J.M. ET AL. VORTEX PHASE MATCHING AS A STRATEGY FOR SCHOOLING IN ROBOTS AND IN FISH. NAT COMMUN 11, 5408 (2020)

gegenseitig ab und vermeiden so Kollisionen. Weiter entfernte Individuen besitzen dagegen anziehende Wirkung. Aus diesen Regeln ergibt sich die Ausrichtung der Fische beim Schwimmen. „Bleib immer in der Nähe der anderen Mitglieder deines Schwarms, komme ihnen aber nicht zu nahe – dann schwimmst du automatisch in dieselbe Richtung wie sie.“

Eine Auswertung der Daten ergab, dass die Richtungswahl der Tiere davon abhängt, in welchem Winkel sich zwei vorausgehende Paviane entfernen. Beträgt dieser weniger als 90 Grad, gehen die nachfolgenden Tiere einen Kompromiss ein und wählen den Mittelweg. Ist der Winkel aber größer als 90 Grad, nehmen die Paviane die Richtung, die von mehr Gruppenmitgliedern bevorzugt wird. Das dominante Tier kann sich dem nur anschließen (*Max Planck Forschung* 02/21).

28

Couzin und sein Team haben darüber hinaus entdeckt, dass die Mitte eines Schwarms entgegen der herkömmlichen Ansicht oft gar nicht die beste Position im Schwarm ist. Die Tiere, die vorne und an den Seiten schwimmen, erhalten einerseits Informationen anderer Schwarmmitglieder. Gleichzeitig haben sie direkten Zugang zu Informationen über Ereignisse außerhalb der Gruppe, wie zum Beispiel das Auftauchen eines Räubers. Der schlechteste Platz ist hinten – was dazu führt, dass die Tiere dort versuchen, diese riskante Position zu verlassen, und sich daher permanent bewegen.

Die Forschenden haben zudem herausgefunden, dass Fische dem Mehrheitsprinzip folgen – und das, obwohl sie selbst nicht zählen können. Schwimmen zehn Fische nach rechts und acht nach links, entscheidet sich der Schwarm in den meisten Fällen für rechts. Überraschenderweise gehen manche Säugetiere ähnlich vor. Zusammen mit Couzins Kolleginnen Meg Crofoot und Ariana Strandburg-Peshkin haben die Forschenden eine Horde frei lebender Paviane in Kenia mit GPS-Sendern ausgestattet und damit die Position jedes einzelnen Tieres über Wochen hinweg bestimmt.

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Das Leben im Schwarm bietet Fischen eine Menge Vorteile: Es schützt unter anderem vor Feinden, spart Energie beim Schwimmen und verbessert die Wahrnehmung.

Fischschwärme bilden sich nach einfachen Regeln: Individuen, die die Nähe zueinander suchen, aber gleichzeitig immer einen Mindestabstand einhalten, schwimmen alle in dieselbe Richtung und bleiben so zusammen. So entsteht ein Schwarm.

Ein Schwarm ist mehr als die Summe seiner Individuen. Er kann kollektive Intelligenz erlangen, über die das einzelne Tier nicht verfügt.

Die Individuen kennen einander nicht, sie sind in der Regel nicht verwandt und bilden auch keine dauerhaften Beziehungen. Früher vermutete man, die Fische innerhalb eines Schwarms seien komplett anonym und egalitär. Die Ergebnisse von Iain Couzin und seinem Team stellen diese Vorstellungen jedoch infrage. Die Forschenden haben Algorithmen für maschinelles Lernen entwickelt, welche einzelne Fische selbst dann noch identifizieren können, wenn diese für uns Menschen vollkommen gleich aussehen. Die Untersuchungen zeigen, dass Schwärme überraschenderweise nicht uniform aufgebaut sind, sondern bislang unbekannte interne Strukturen aufweisen. Die Tatsache, dass ein Schwarm ein sich selbst organisierendes System ist, bedeutet also nicht, dass alle Individuen den gleichen Einfluss auf sein Verhalten haben. Trotz einer fehlenden offensichtlichen Hierarchie sind manche Individuen den Analysen zufolge wichtiger als andere. Fische am Rand des Schwarms reagieren als Erste auf Veränderungen, zum Beispiel auf einen Angreifer, und lenken dadurch mehrere Sekunden lang die Bewegungsrichtung der

Die Weisheit der Vielen:  
Angela Albi, Eduardo  
Sampaio, Kajal Kumari,  
Iain Couzin und Lior  
Lebovich (von links)  
diskutieren ihre Ideen  
zum Schwarmverhalten  
gerne kollektiv.



FOTO: INES JANAS FÜR MPG

Gruppe. Manche Individuen wiederum schwimmen schneller als andere und können aufgrund dessen den Schwarm über längere Zeiträume hinweg anführen, beispielsweise bei der Nahrungssuche. Solche individuellen Unterschiede sind bislang noch kaum untersucht worden. Dabei geben sie einer uniform scheinenden Gruppe Struktur und beeinflussen ihr Verhalten massiv.

## Gemeinsam zu besseren Entscheidungen

Zusammen mit Kollegen und Kolleginnen von den Universitäten Konstanz und Cambridge hat Couzin an Stichlingen den Einfluss individueller Unterschiede auf das Gruppenverhalten untersucht. Die Forschenden analysierten die Verhaltensmuster mehrerer Individuen in unterschiedlichen Umgebungen. Anschließend setzten sie die Fische in Gruppen zusammen und beobachteten, wie die Tiere Nahrungsquellen auffindig machten und nutzten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Individuen, die mehr Zeit in der Nähe der Artgenossen verbrachten, langsamer waren, sich eher im Zentrum der Gruppe aufhielten und auch dazu neigten, anderen Fischen zu folgen. Eine Gruppe, die hauptsächlich aus solchen Individuen bestand, hielt zwar stärker zusammen, bewegte sich aber auch weniger und unkoordinierter. Gruppen aus weniger auf

Nähe zu Artgenossen bedachten Tieren hielten hingegen schlechter zusammen, schwammen jedoch schneller. Dabei stellt sich auch die Frage nach der „Persönlichkeit“ von Fischen. Warum schwimmen die einen schneller als die anderen? Sind sie mutiger? Sind die einen vielleicht altruistischer, während andere deutlicher auf den eigenen Vorteil bedacht sind und ihre Schwarmgenossen ausnutzen? „Ich persönlich spreche nicht so gerne von der ‚Persönlichkeit‘ von Fischen, denn ich halte einen solchen Begriff nicht für sehr hilfreich, um relativ einfache Unterschiede zu beschreiben. Letztlich wissen wir noch nicht, ob eine Sardine schneller schwimmt, weil sie mutiger ist oder weil sie schlicht größer oder stärker ist“, sagt Couzin. Wie man die Verschiedenheiten zwischen den Schwarmmitgliedern auch nennen mag, es reichen bereits einzelne kleine Unterschiede aus, um die Entscheidungsfindung sowohl eines Individuums als auch eines ganzen Schwarms zu beeinflussen.

Eine große Zahl in Verbindung stehender Einheiten, die untereinander Informationen austauschen und dadurch als Kollektiv bessere Entscheidungen treffen können – erinnert das nicht an die Arbeitsweise des Gehirns? „Das ist richtig. Unsere Experimente mit Schwarmfischen haben gezeigt, dass nicht nur das Gehirn der Fische Informationen verarbeitet, sondern auch der Schwarm als Ganzes. Wie verlässlich der Schwarm beispielsweise auf einen Angreifer reagiert, das hängt nicht von der Empfindsamkeit der einzelnen



Fische ab, sondern von ihrer Position zu- und dem Abstand voneinander: Sie sollten einander möglichst gut sehen, damit Informationen optimal weitergegeben werden können. In unserem Gehirn folgen Nervenzellen demselben Prinzip“, so Iain Couzin. Ändert sich die Verbindung zwischen den Individuen beziehungsweise den Nervenzellen, so beeinflusst dies auch den Informationsfluss zwischen ihnen. Dadurch kann sich das Verhalten des Gesamtsystems ändern. Den Forschenden zufolge können Fische in einem Schwarm auf diese Weise früher auf Gefahren reagieren, ohne dass die Gefahr von Fehlalarmen steigt. Allzu empfindsame Fische oder Neurone hingegen, die auf jedes noch so kleine Anzeichen einer Gefahr reagieren, würden massenhafte Fehlalarme auslösen.

Fischschwärme und andere Tiergruppen entwickeln auf diese Weise Fähigkeiten, welche die einzelnen Tiere nicht besitzen. Der Schwarm ist folglich mehr als die Summe seiner Teile – auch dies eine Analogie zum Gehirn. Darauf beruht auch die im Zusammenhang mit

dem Internet viel zitierte „Weisheit der Vielen“. Das – zum Teil fehlerbehaftete – Wissen der Einzelnen ergibt in der Summe ein recht genaues Abbild der Wirklichkeit. „Ein Schwarm kann auf diese Weise ein kollektives Gedächtnis entwickeln und sich an Dinge erinnern, die ein bestimmtes Tier unter Umständen gar nicht selbst erlebt hat“, erklärt Couzin. Ein solch „kollektiver Geist“ ist auch von Staaten bildenden Tieren wie Ameisen und Bienen bekannt. Anders als diese Insekten sind die Fische eines Schwarms jedoch nur selten miteinander verwandt. Die Evolution kann deshalb nicht den Schwarm selbst optimieren, sondern nur dessen Individuen.

Die Weisheit der Vielen ist aber bekanntlich nicht unendlich. Iain Couzin und sein früherer Doktorand Albert Kao, der seit Kurzem seine eigene Forschungsgruppe in Boston leitet, haben gezeigt, dass der Informationsvorsprung, den das Leben im Schwarm verleiht, ab einer Gruppengröße von fünfzehn bis zwanzig Individuen wieder zurückgeht. Doch warum bilden dann

30

FOTO: INES JANAS FÜR MPG



manche Arten Schwärme aus vielen Tausend Individuen? „Anders als es auf den ersten Blick erscheinen mag, sind viele Großgruppen nicht gleichförmig, sondern durchaus heterogen aufgebaut, das heißt, sie besitzen Untergruppen. Große Elefantenherden zum Beispiel bestehen aus verschiedenen Familien und Clans“, so Couzin. Solche Gruppenstrukturen können verhindern, dass der Informationsfluss abreißt.

## Schwarm-Code geknackt

Dank der von ihnen entwickelten Analysewerkzeuge können die Forschenden Stück für Stück aufklären, wie Fische ihr Verhalten im Schwarm koordinieren. Dies gibt auch Hinweise darauf, wie der Mensch diese Regeln für eine effektive Koordination von Schwärmen autonomer Fahrzeuge wie Drohnen anwenden könnte. „Ich glaube, dass wir den Code endlich geknackt haben. Die von der Natur entwickelten Regeln sind demnach wahrscheinlich genauso gut wie die vom Menschen geschaffenen,



FOTO: INES JANAS FÜR MPG

Auf Sparkurs: Strömungsexperimente mit Roboterfischen zeigen, dass der Energieverbrauch beim gemeinsamen Schwimmen sinkt.

aber viel einfacher und robuster. Unsere Studien an Fischen könnten sich also schon bald auf unser tägliches Leben auswirken.“ Noch ist nicht klar, ob auch Fischschwärme solche Strukturen besitzen. Couzin und sein Team wollen diese Wissenslücke schließen. Helfen soll ihnen dabei ihre jüngste Entwicklung: eine auf künstlicher Intelligenz basierende Software, die die Bewegungen jedes einzelnen Fisches eines Schwarms verfolgen kann. „Wir müssen die Tiere nicht mal vorher markieren. Unser Algorithmus kann jedes Individuum identifizieren und seine Route messen. Das wird die Erforschung des Schwarmverhaltens revolutionieren“, sagt Couzin. Fischschwärme durchziehen die Weltmeere seit Jahrmillionen – Räubern und Umweltveränderungen zum Trotz. Vor Kurzem ist aber ein Spieler auf der Bildfläche erschienen, der sich nicht an die Spielregeln hält: der Mensch. Vor Fischtrawlern mit ihren heute oft kilometerlangen Netzen bieten selbst riesige Schwärme keinen Schutz – im Gegenteil, sie ziehen die Fangflotten erst recht an. Viele Fischbestände sind deshalb inzwischen eingebrochen.

31

Auch die Zahlen vieler anderer Tiere, die Gruppen bilden, sind stark zurückgegangen: Vögel, große Säuger, Insekten. Was das für das Überleben dieser Arten bedeutet, ist noch nicht absehbar. Es könnte zum Beispiel einen Schwellenwert geben, ab dem sich nicht mehr genügend viele Individuen zu einem Schwarm zusammenfinden können. Eine Art könnte dann aussterben, obwohl es noch viele Tausend Individuen davon gibt. „Die Erforschung von Schwärmen trägt deshalb auch zum Artenschutz bei“, sagt Iain Couzin. Ob Fischschwärme in Zukunft noch durch die Weltmeere ziehen, ist also höchst ungewiss. Zu wünschen wäre es – und dies nicht nur, weil sie ein Symbol sind für die Macht der Kleinen und Wehrlosen, wenn sie sich zusammenschließen.

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



Was den Schwarm im Innersten zusammenhält: Projektleiter Liang Li nutzt ausgefeilte Technik, um herauszufinden, nach welchen Regeln Fische ihr gemeinsames Verhalten koordinieren.

**Riskante Enge:** Beim Hadsch, der großen Pilgerfahrt, an der gläubige Muslime mindestens einmal im Leben teilnehmen sollen, versammeln sich oft Millionen von Pilgern in Mekka. Dabei kommt es immer wieder zu dramatischen Massenunfällen: Im Januar 2006 verloren 363 Menschen ihr Leben (hier ein Bild vom Auftakt jenes Hadsch).



# NEUN PRO QUADRATMETER

TEXT: MARTIN TSCHECHNE



FOTO: MUHANNAD FALAAH/GETTY IMAGES

Wie orientieren sich Einzelne in der Menge? Wie verbreitet sich Hass im Internet? Und was hat das eine mit dem anderen zu tun? Mehdi Moussaid, Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin, beobachtet Menschen in Bewegung. Und erklärt, weshalb es dabei manchmal zu Katastrophen kommt.

Es war ein Moment, in dem menschliche Existenz in einen anderen Aggregatzustand überging. Buchstäblich. In dem sie sich auflöste, die Grenzen der eigenen Körperlichkeit transzendierte und zerfloss im Strom der Masse. Ein Moment, in dem sich die Hölle auftat.

Der 12. Januar 2006. Wie in jedem Jahr hatten sich mehr als zwei Millionen gläubige Muslime aus der ganzen Welt auf den Weg nach Mekka gemacht, um dort den Satan symbolisch zu steinigen und die Kaaba, den schwarzen Schrein im Hof der Großen Moschee, siebenmal zu umkreisen. Und wie in jedem Jahr schoben sich die Pilger über Brücken und durch breite Korridore dem heiligen Ort entgegen, dicht gedrängt und kaum zu einer eigenen Bewegung fähig. Immer wieder hatte es Tote gegeben, in schlimmen Jahren mehrere Hundert, manchmal mehr als tausend, die im Strom untergingen und zu Tode getrampelt wurden. Oder solche, die einfach in der Menge erstickten. Die saudischen Aufseher über das Ritual wussten keinen Rat. Irgendjemand musste herausfinden, wie genau solche Katastrophen entstehen. Und wie sie sich in Zukunft verhindern lassen.

So kam es, dass der schwedische Ingenieur und Physiker Anders Johansson zum ersten Mal filmen konnte, wie die Masse der Pilger zwischen den Mauern der Zuwege hin und her wogte, als wälzte sich ein Ozean im Orkan. Wie sie sich zu Wellbergen türmte, gegen Seitenwände krachte und unter sich begrub, wer nicht das Glück hatte, nach oben hinausgequetscht zu wer-

den. In keinem Fußballstadion und bei keinem Rockkonzert drängen sich auch nur annähernd so viele Menschen an einem Ort wie zum Hadsch, der alljährlichen Wallfahrt nach Mekka. Am Ende dieses unseligen Tages im Januar 2006 waren dort 363 Tote zu beklagen.

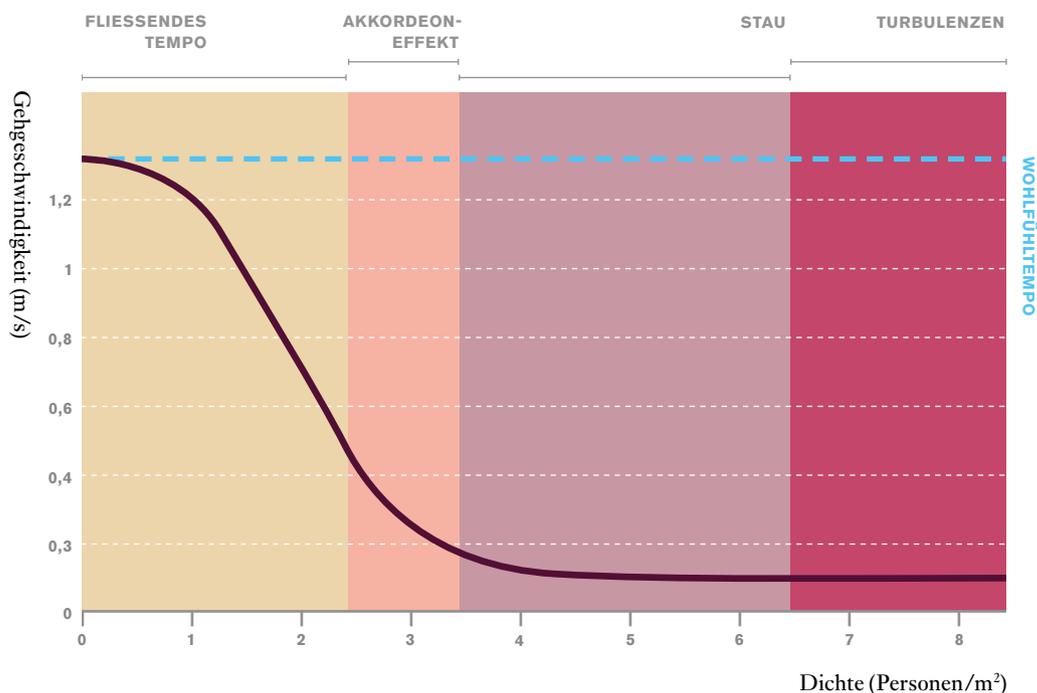
Mehdi Moussaid hat die schrecklichen Szenen auf seinem Bildschirm. Erstklassiges Forschungsmaterial, wie er achselzuckend zugibt. Er war Student, als er auf die Arbeit des Teams um Johansson und den in Zürich

**„Wir neigen dazu, die Ursachen solcher Ereignisse in Leichtsinn oder religiösem Fanatismus zu suchen – alles Unsinn! Das ist reine Physik.“**

MEHDI MOUSSAID

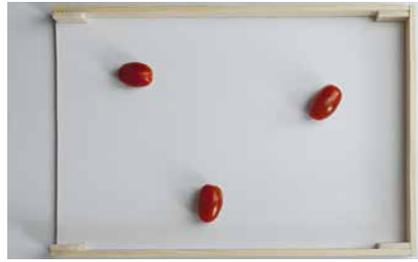
34

Je dichter, desto langsamer:  
Die Zahl der Menschen pro Quadratmeter bestimmt, wie schnell sich jemand fortbewegen kann. Schon bei ein bis zwei Personen pro Quadratmeter müssen Leute einander ausweichen, das Tempo verlangsamt sich. Wird die Menge dichter, entsteht der sogenannte Akkordeon-effekt, es geht nur mehr im Stop-and-go voran. Wird das Gedränge noch enger, müssen sich die Menschen mit der Masse bewegen. Gefährlich wird es, wenn die Menschen so eng stehen, dass schon kleine Bewegungen Turbulenzen auslösen können.



GRAFIK: GCO NACH MEHDI MOUSSAID/MPI FÜR BILDUNGSFORSCHUNG

Datteltomaten als Modell:  
 Eine Tomate bildet recht exakt den Umriss eines menschlichen Körpers ab. Auf einer Fläche von 15 Quadratmetern können sich zwei bis drei Leute im Corona-Abstand von 1,5 Metern aufhalten (1). Schon bei zwei Personen pro Quadratmeter kommt man nur mehr langsam vorwärts (2). In der S-Bahn, wenn Züge in der Stoßzeit ausfallen, drängen sich oftmals fünf Personen pro Quadratmeter (3). Gefährlich ist diese Enge noch nicht, da Stöße von den Körpern ausgeglichen werden. Bei acht Personen pro Quadratmeter (4) besteht dagegen Lebensgefahr: Auf der Loveparade 2010 in Duisburg starben bei dieser Dichte 21 Menschen.



FOTOS: MEHDI MOUSSAID/MPF FÜR BILDUNGSFORSCHUNG

lehrenden Physiker und Soziologen Dirk Helbing aufmerksam wurde und sich den Forschenden anschloss. Heute ist er vierzig. Und wie es der böse Zufall wollte: Am 24. Juli 2010, nur wenige Tage nachdem er an der Universität von Toulouse seine Dissertation zur Entstehung von Turbulenzen in Menschenansammlungen verteidigt hatte, wurden bei der Loveparade in Duisburg 21 Besucher der Massenparty zu Tode gedrückt und getreten, 652 weitere zum Teil schwer verletzt. „Mit sechs oder sieben Personen pro Quadratmeter“, stellt der Forscher fest, „ist die kritische Grenze erreicht und überschritten.“ In Mekka waren es bisweilen neun.

Er klickt ein anderes Bild auf seinen Schirm, leuchtend rote Datteltomaten in einem Geviert aus hellen Holzleisten. Hübsch anzuschauen. Im Zeitraffer kommen immer mehr Tomaten hinzu, es wird eng und enger, bis die ersten Früchte platzen und roter Saft aus ihnen quillt. Was harmlos begann, endet drastisch. Die Parallelen sind überdeutlich. Die Menschen in der Masse werden geschoben und stürzen, jede Lücke schließt sich sofort; jeder Impuls wird weitergegeben und schaukelt sich auf zu einer machtvollen Woge. „Wir neigen dazu, die Ursachen solcher Ereignisse in persönlicher Schuld zu suchen“, sagt Moussaid, „in jugendlichem Leichtsinne, religiösem Fanatismus, in Alkohol oder Drogen. Alles Unsinn! Was hier passiert, folgt allein den Gesetzen der Hydrodynamik, der Strömungslehre und der Mechanik. Reine Physik. Es geht um Formeln. Ganz einfach.“

## Die Muster sind erstaunlich ähnlich

Er selbst kam als Ingenieur ins Grenzgebiet der Disziplinen: Computer Science. Aber nach sechs Monaten als Programmierer und Datenanalyst in der Wirtschaft war der Reiz verflogen. Er wollte forschen. Vom Studium der Bienen und Ameisen, der Schwärme von Vögeln, Insekten oder Fischen im Labor für Verhaltensforschung in Toulouse kam er über die Schnittstelle zwischen Physik und Sozialwissenschaften an der ETH in Zürich nach Berlin an das Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, Forschungsbereich „Adaptive Rationalität“. Dessen Direktor, Ralph Hertwig, ist Psychologe. „Ich passe da gut hinein“, sagt Moussaid und lacht: „Ich bin kein Spezialist in Psychologie, nicht mal in Informatik oder Biologie – aber ich weiß sehr gut, wie man sich zwischen den Fächern bewegt.“

Wie kann sich ein ganzer Schwarm von Fischen im selben Moment in eine andere Richtung wenden? Welche Dynamik entfaltet eine Woge von Hass im Internet? Wie pflanzt sich die Information über eine Bedrohung durch eine Telefonkette fort? Wie Wellen in einer Flüssigkeit. Manchmal muss der Forscher beinahe lachen darüber, wie weit die Gesetze der Naturwissenschaften den Alltag einer hochzivilisierten Gesellschaft bestimmen. Und wird sehr ernst beim Gedanken daran, welche Möglichkeiten zur Fernsteuerung sich dabei eröffnen. Dann geht es um die subtilen und nicht so subtilen Mechanismen der sozialen Beeinflussung und der Manipulation: Welchen Einfluss hat das sichere Auftreten eines anderen auf das eigene Urteil? Welchen die Überzeugung einer großen Mehrheit? Wann fliehen Menschen aus ihrer Heimat? Wie bewegen sich Leute durch ein enges Netz von Gängen? Und was beeinflusst die Wahl eines Fluchtweges? Die Muster, sagt Moussaid, seien einander erstaunlich



Engagierter Kommunikator: Mehdi Moussaid arbeitet am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung. In seiner Freizeit produziert er Youtube-Videos in seiner Muttersprache Französisch, in denen er sein Forschungsgebiet anschaulich erklärt.

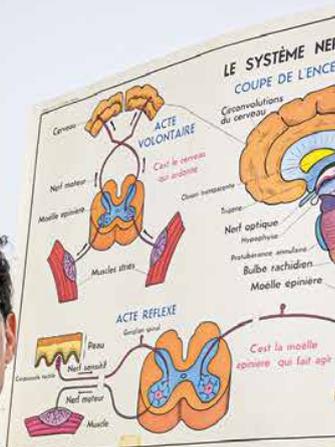
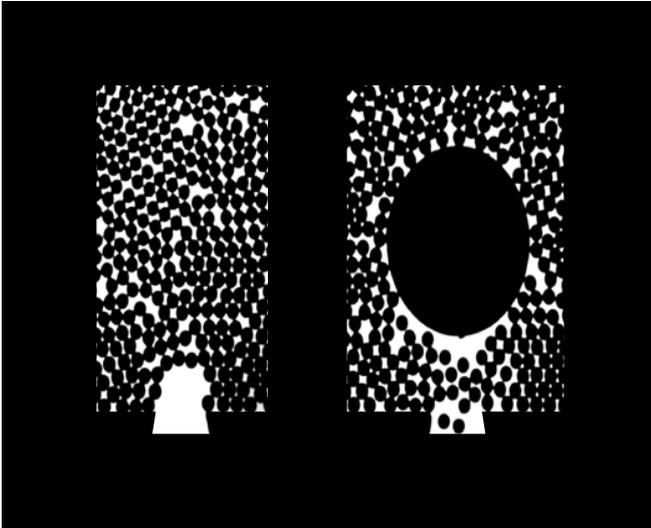


FOTO: DAVID AUSSERHOFER FÜR MPG



Hilfreiches Hindernis: Eine Barriere kurz vor dem Ausgang führt dazu, dass sich die Menge teilt und dadurch leichter hinausströmen kann.

ähnlich. Erkenntnisse aus dem einen Feld lassen sich auf das andere übertragen. Der Wissenschaftler spricht in seiner Muttersprache Französisch von *foulo-scopie* – abgeleitet von *la foule*: die Menschenmenge, die Masse – und davon, was die Masse über uns sagt.

## Massenhysterie entsteht durch Nachahmung

In der Shoppingmall am Berliner Alexanderplatz gibt es einen Balkon, der einen ungehinderten Überblick bietet, wie Ströme von Menschen einander begegnen und ganz leicht, beinahe elegant aneinander vorbeigleiten. Moussaid glaubte schon, einen optimalen Platz für seine Analyse der hochkomplexen, kollektiv koordinierten Bewegungsmuster gefunden zu haben, noch dazu vor der eigenen Haustür – bis die Wachleute kamen und ihn mitsamt Videokamera hinauskomplimentierten. Auf den Datenschutz wiesen sie hin. Auf das Recht am eigenen Bild. Als hätte es der Beobachter auf einzelne Personen abgesehen.

Also entwickelte Moussaid eine Versuchsanordnung: eine Art Computerspiel, in dem er Avatare, auf dem Bildschirm simulierte Stellvertreter, in ein beliebig zu variierendes Gedränge schickt. Die virtuellen Wesen sehen aus wie hölzerne Gliederpuppen, sie lassen sich per Mausklick durch verwinkelte Flure und enge Passagen navigieren, manche drängeln sich vor, Wegweiser leuchten auf – die lebenden Teilnehmer seiner Studien sitzen dabei alle im selben Raum, jeder vor seinem Bildschirm, die anderen Spieler in Sichtweite. Irgend-

eine Form von Kontakt muss schon bieten, wer Interaktion beobachten will. Es geht um Validität.

Was er herausfand: Die ruckartige, dabei faszinierend synchrone Richtungsänderung eines Schwarms von Heringen ist gar nicht so weit entfernt vom Verhalten von Menschen in größeren Gruppen. Die Bewegung des nächsten Nachbarn ist ein sehr wichtiger Impuls. Einer weiß, wo es langgeht, die anderen folgen. Entschiedenheit im Auftreten überzeugt andere. Massenhysterie entsteht durch Nachahmung. Erhöhte Belohnung, Strafe, ein rot blinkendes Licht oder Zeitdruck erzeugen Stress; wird die Dichte größer, kippt das Gedränge vor einem engen Ausgang schnell um in Panik. Und, klar, je breiter das Tor, desto schneller die Flucht nach draußen. Wieder ruft Moussaid ein Bild auf seinen Schirm. Zu sehen sind zwei Trichter, in die jemand trockenen Reis schüttet, rechts schwungvoll in einem Schwall, links langsam in stetem Fluss. Und während links der Reis ungehindert in die Schüssel rinnt, verstopfen rechts die Körner das enge Rohr.

Ein neuer Film erscheint auf dem Schirm. Schafe, die sich in ihrem Pferch vor einem engen Ausgang drängen. Und tatsächlich: Je heftiger die Tiere angetrieben werden, je größer ihre Angst, desto zappeliger wird das Gedränge. Und desto länger dauert es. „Reine Physik“, sagt Moussaid wieder, aber wer denkt schon an das Reißverschlussverfahren, wenn von hinten tödliche Gefahr droht? Mehdi Moussaid spult die Katastrophen herunter, die alle nach ähnlichem Muster verlaufen sind, Heysel in Belgien, Hillsborough in England, das jüdische Fest Lag baOmer 2021 in Israel: 39 Tote, 97 Tote, 45 Tote.

## Das Trauma der Terrorattacken wirkt fort

Aber auch der Terroranschlag im November 2015 in Paris: Rund 1500 Menschen drängten sich in der Konzerthalle Bataclan, als drinnen islamistische Terroristen das Feuer eröffneten. 90 Tote, weitere 40 im Rest der Stadt, Hunderte von Verletzten, kein Entkommen. Und nicht auszudenken, was geschehen wäre, hätten die Attentäter auch das Fußballstadion Stade de France gestürmt, in dem 80000 Zuschauer beim Länderspiel Frankreich gegen Deutschland nur den dumpfen Knall detonierender Sprengsätze hörten. Das Trauma der Terrorattacken wirkt bis heute fort. Manchmal ergreifen Menschen die Flucht, weil sie Anzeichen einer neuen Attacke erkannt zu haben glauben, manchmal nur, weil andere wegrennen.

Moussaid ist ein Kommunikator. Er ermittelt seine Befunde nicht nur in konkreten Situationen, er verbreitet sie auch so. Erzählt Geschichten, illustriert sie in an-



schaulichen, bisweilen heftigen Bildern, sucht nach eingängigen Analogien und hält Vorträge in mitreißender Begeisterung. Er schreibt populäre Bücher und Artikel, tritt gern im Radio auf, produziert Hörbücher und betreibt in seiner Heimat Frankreich einen YouTube-Kanal mit 300 000 Followern. Mal ehrlich: Wendet er seine Erkenntnisse zur Kraft der Überzeugung vielleicht auch auf die eigenen Inhalte an?

## Die Wege in Mekka wurden neu konzipiert

Er lacht. Seine Lehrer und Kollegen von früher beraten heute Verkehrsplaner und Architekten. Die Wegeführung in Mekka wurde nach ihren Vorgaben neu konzipiert, ein Kontrollzentrum überwacht Fließgeschwindigkeit und Dichte des Pilgerstroms, Einbahnstraßen teilen ihn auf. Engpässe wurden ausgebaut, Flaschenhälse beseitigt, vor denen die Gläubigen sich aufgestaut hatten wie Reiskörner in einem Trichter. Die Spezialisten drosseln den Zufluss zu Massenveranstaltungen, indem sie Zeitfenster öffnen und wieder schließen. Sie begrenzen den Zutritt oder stellen, scheinbar paradox, ein Hindernis vor einen engen Ausgang, eine Art Wellenbrecher, vor dem die strömende Masse sich teilt, um dann umso leichter hinauszugleiten. Das Prinzip ähnelt der Formel, nach der eine Tragfläche berechnet wird, um ein Flugzeug in der Luft zu halten. Und ist auch hier sehr hilfreich bei der Vermeidung von Katastrophen.

Moussaid stößt derweil als Forscher auf das Feld vor, auf dem das Geschehen nicht mehr allein den Gesetzen der Physik folgt, sondern Kognition und adaptive Rationalität die Regie übernehmen. Also bei weniger als drei, vier, fünf Personen pro Quadratmeter. „Es ist schon faszinierend“, bestätigt er und zeigt auf die Holzfiguren in seinen virtuellen Labyrinthen: „Die schlichte Anzahl der Menschen bestimmt, welche wissenschaftliche Disziplin die besten Erklärungen und Prognosen liefert.“ Ob die Menschen sich im Gedränge gegenseitig blockieren oder die Freiheit haben, selbst über ihr Verhalten zu entscheiden. Ob sie das eigene Interesse vor das der Gemeinschaft stellen oder einander den Vortritt lassen, weil sie dabei schneller vom Fleck kommen. Kollektive Intelligenz, auch wenn von hinten einer „Feuer!“ schreit. Die Dichte, auch wahrgenommene oder vorweggenommene Dichte, schränkt jede Bewegungsfreiheit ein.

War es wirklich so, dass Napoleon die Bewohner der von ihm unterworfenen Länder zwang, auf die rechte Seite des Weges auszuweichen, wenn sie einander begegneten – damit sie nicht in einer schnellen Bewegung mit der Rechten das Schwert ziehen und gleich zuschlagen konnten? Der Entgegenkommende könnte ja auch ein

Soldat der Besatzungsmacht sein. „Hübsche Geschichte“, erwidert Moussaid und lacht wieder. „Aber leider nur ein Mythos. Und nicht totzukriegen.“ Tatsächlich, sagt er, sei die Heuristik, nach rechts oder links auszuweichen, das Resultat eines Lernprozesses im sozialen Umfeld: Man einigt sich, in der einen Gegend auf die eine, in einer anderen auf die andere Seite. Ganz einfach, weil sich Kollisionen anders nicht vermeiden lassen. Die Regeln im Straßenverkehr haben einen gewissen, aber nicht zwingenden Einfluss. In Mitteleuropa, vielfach überprüft und nachgewiesen, hat die überwiegende Mehrheit den Impuls, im Zweifel zur rechten Seite auszuweichen. Schön zu erkennen auf dem kurzen Filmschnipsel aus der Shoppingmall am Alexanderplatz.

Fast zehn Jahre lang schien es, als hätten die Analyse und die Korrektur der Pilgerströme in Mekka eine bis dahin schicksalhafte Kette von Unglücksfällen beendet. Bis zum 24. September 2015. An diesem Tag verursachte irgendeine Störung im Ablauf eine Panik, wie es noch keine zuvor gegeben hatte. Weit mehr als 2000 Tote waren zu beklagen. Lag es daran, dass der saudische Kronprinz Mohammed bin Salman, wie die iranische Presse später behauptete, eine Sperre errichten ließ, um sich einen bequemen Weg durch die Massen zu bahnen? Moussaid ist skeptisch. Für ihn stößt jeder Versuch von Vorhersage und Vorbeugung irgendwann an eine Grenze. „Solche Ereignisse haben viele Ursachen“, sagt er. „Meistens zu viele, als dass man sie auch nur identifizieren könnte.“

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



## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die Bewegungen von Einzelpersonen in dichten Menschenmengen entsprechen physikalischen Gesetzen. Entsprechende Berechnungen können helfen, große Versammlungen zu steuern und Massenunglücke zu vermeiden.

Bei weniger dichten Menschenansammlungen spielen psychologische Faktoren die wesentliche Rolle für das Verhalten der Einzelpersonen und damit auch für das Verhalten der Menge.

**„Die schlichte Anzahl der Menschen bestimmt, welche wissenschaftliche Disziplin die besten Erklärungen und Prognosen liefert.“**

MEHDI MOUSSAID



# Sunrise reloaded

**Mit Sami Solankis ballongetragenem Observatorium SUNRISE werden im Sommer 2022 erneut die Magnetfelder der Sonne beobachtet.**

Die Stiftung fördert das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung und unterstützt den dritten Flug des größten und auflösungsstärksten Sonnenteleskops, das je den Erdboden verlassen hat. Nur so kann besser erforscht werden, welchen Einfluss die Sonne auf das System Erde hat.

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!

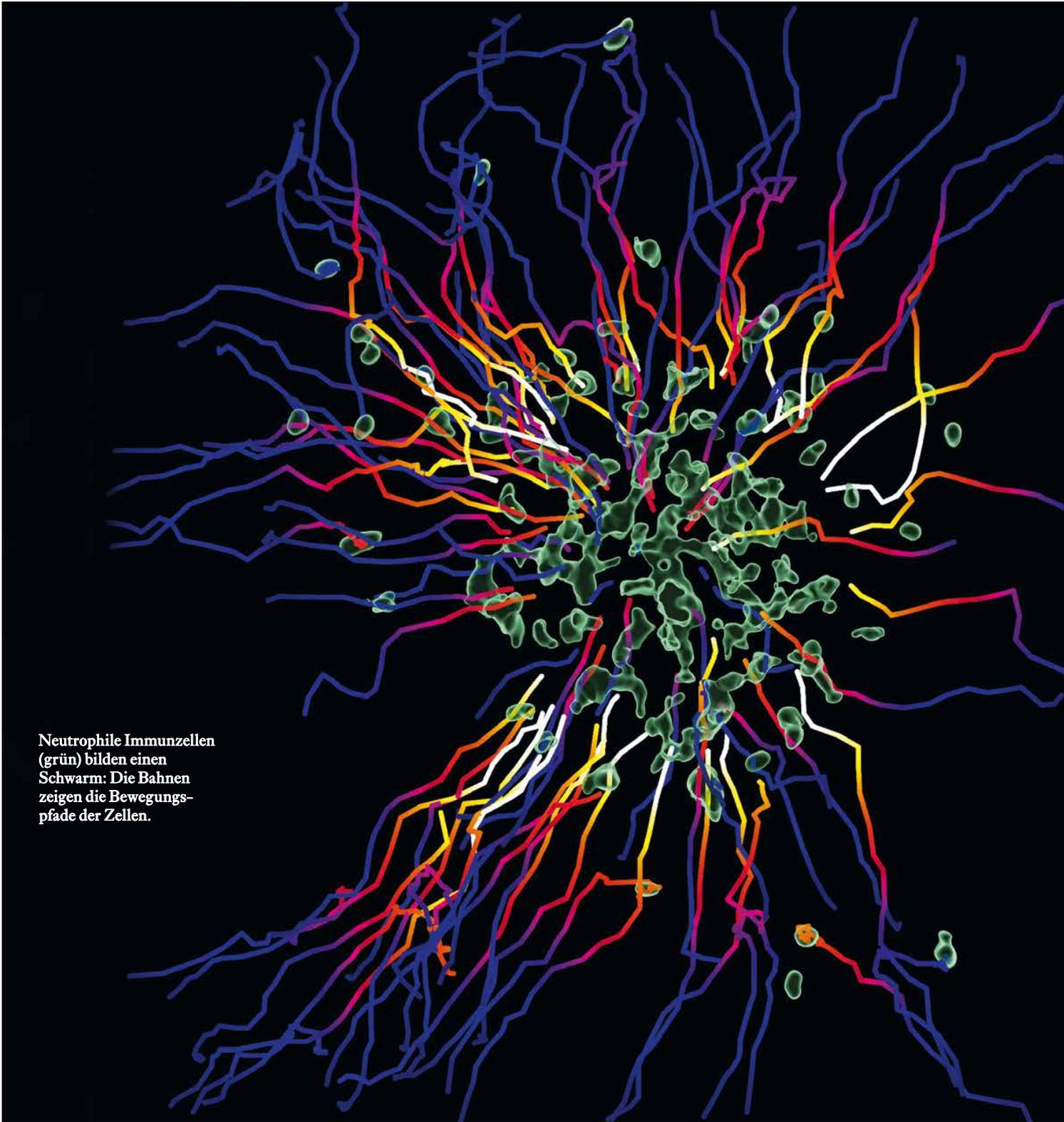
**Max-Planck-Förderstiftung**  
**Deutsche Bank**  
**IBAN DE46 7007 0010 0195 3306 00**

ANZEIGE

[www.maxplanckfoundation.org](http://www.maxplanckfoundation.org)



**MAX PLANCK**  
Förderstiftung



Neutrophile Immunzellen (grün) bilden einen Schwarm: Die Bahnen zeigen die Bewegungspfade der Zellen.

# LOCKSTOFFE FÜR DAS KOLLEKTIV

TEXT: TIM LÄMMERMANN & HARALD RÖSCH

FOTO: TIM LÄMMERMANN/MPI FÜR IMMUNBIOLOGIE UND EPIGENETIK

41

Der Max-Planck-Wissenschaftler Tim Lämmermann erforscht, wie Immunzellen in Schwärmen auf die Jagd nach Krankheitserregern gehen. Die Zellen zeigen dabei ein Verhalten, das Biologen auch von einem Insekt kennen: der Asiatischen Honigbiene.

Katharina Glaser arbeitet im Labor von Tim Lämmermann an ihrer Doktorarbeit. Hier isoliert sie neutrophile Granulozyten.



FOTO: LENA GIOVANAZZI FÜR MPG

Im Kampf Frau gegen Frau hat die Asiatische Honigbiene gegen eine Hornisse keine Chance. Trotzdem kann sich die Biene gegen den Eindringling behaupten – wenn sie ihre Schwestern zu Hilfe ruft: Verletzt eine angreifende Hornisse eine Biene, werden Pheromone freigesetzt, die andere Arbeiterinnen des Stocks alarmieren. Diese eilen daraufhin in großer Zahl herbei und bilden mit ihren Leibern eine undurchdringliche Kugel um die Hornisse. Im Innern des Balls steigt die Temperatur so stark an, dass die Hornisse buchstäblich „gekocht“ wird und an Überhitzung stirbt.

Wenn auch Zellen des Immunsystems auf den ersten Blick mit Bienen wenig gemeinsam haben, im Verteidigungsfall verhalten sie sich ganz ähnlich. Insbesondere Zellen der angeborenen Immunantwort wenden dieselbe Taktik an, wenn sie auf Krankheitserreger treffen. Geleitet von verschiedenen Alarm- und Botenstoffen strömen sie aus allen Richtungen zu den Eindringlingen. Anders als die Bienen töten diese Zellen Eindringlinge jedoch nicht durch Überhitzung, sie schirmen die Erreger vielmehr vom umliegenden gesunden Gewebe ab und machen sie mithilfe ihrer chemischen Waffen unschädlich. „Es ist eine faszinierende Erkenntnis, dass das Schwarmverhalten von Immunzellen und Insekten zum Teil ähnlichen Regeln folgt – obwohl sie doch ganz unterschiedliche Einheiten des Lebens sind“, sagt Tim Lämmermann.

## Jäger und Wächter des Immunsystems

Lämmermann und sein Team konzentrieren sich am Max-Planck-Institut für Immunbiologie und Epigenetik in Freiburg auf sogenannte neutrophile Granulozyten. Die auch einfach als Neutrophile bezeichneten Immunzellen werden im Knochenmark gebildet und patrouillieren im Blut durch den ganzen Körper. Sie bilden als Wächter und Jäger einen wichtigen Bestandteil des angeborenen Immunsystems und sind mit die Ersten am Ort einer Entzündung oder Infektion. Dank ihrer flexiblen Form bewegen sie sich wie Amöben vorwärts und schlüpfen so durch die Wände von Blutgefäßen und selbst dichtes Gewebe. Mithilfe molekularer Sensoren auf ihrer Oberfläche erkennen die Neutrophilen Alarmsignale verletzter oder geschädigter Zellen. Eindringlinge wie Bakterien, Parasiten und Pilze werden mithilfe antimikrobieller Substanzen abgetötet.

larer Sensoren auf ihrer Oberfläche erkennen die Neutrophilen Alarmsignale verletzter oder geschädigter Zellen. Eindringlinge wie Bakterien, Parasiten und Pilze werden mithilfe antimikrobieller Substanzen abgetötet.

Vor fünfzehn Jahren beobachteten Forschende mittels spezieller Mikroskopie in verschiedenen Organen von Mäusen ein bemerkenswertes Verhalten der Neutrophilen: Sobald die Wissenschaftler eine Entzündung hervorriefen oder Krankheitserreger das Gewebe infizierten, strömten diese Immunzellen aus allen Richtungen zusammen. Sie verhielten sich dabei wie ein Schwarm und griffen die Erreger koordiniert an. „Es war damals schon offensichtlich, dass sich die Zellen untereinander koordinieren, auch wenn noch nicht bekannt war, wie sie das tun“, so Lämmermann. Zu schwärmenden Immunzellen kam Lämmermann über Umwege. Zunächst konzentrierte sich der Wissenschaftler, der nach seiner Promotion an den National Institutes of Health in den USA forschte, auf Makro-

# „Das Schwarmverhalten von Immunzellen und Insekten folgt zum Teil ähnlichen Regeln.“

TIM LÄMMERMANN

phagen. Auch diese Zellen der angeborenen Immunantwort machen Jagd auf Krankheitserreger und beseitigen diese. „Es stellte sich rasch heraus, dass Makrophagen 20- bis 100-mal langsamer sind als Neutrophile. Das machte die Experimente zeitaufwendig und mühsam. Bei dem Schnecken tempo der Makrophagen wäre mein Visum abgelaufen, bevor ich die ersten Ergebnisse aufzuweisen gehabt hätte“, erzählt Lämmermann mit einem Augenzwinkern. Beim Blick durchs Mikroskop fiel dem Forscher aber noch etwas auf: Neben den lahmen Makrophagen huschten immer auch Neutrophile durchs Bild. „Im Vergleich zu den trägen Makrophagen war das ein regelrechtes Gewusel. Daraufhin habe ich kurzerhand auf die Neutrophilen umgesattelt – eine Entscheidung, die sich als goldrichtig herausgestellt hat.“ Fasziniert von diesem Verhalten verschiebte sich Lämmermann fortan der Erforschung des Schwarmverhaltens dieser Immunzellen. Seitdem haben er und sein Team wichtige Erkenntnisse darüber gewonnen, wie sich die Zellen zu einem Schwarm

zusammenfinden und diesen wieder auflösen können. Letzteres ist entscheidend dafür, dass die Immunreaktion nicht übers Ziel hinausschießt.

Zusammen mit Forschenden anderer Institutionen hat Lämmermann verschiedene Etappen der Schwarmbildung identifiziert: Kurz nach einer Verletzung verändern einige wenige Neutrophile in unmittelbarer Umgebung ihr Bewegungsmuster und wandern gezielt zum Ort der Entzündungsreaktion. Auf diese erste folgt eine zweite Welle von Zellen aus entfernteren Körperregionen. Angezogen werden die Neutrophilen durch einen Mix an Substanzen, die von geschädigten oder sterbenden Zellen abgegeben werden und die sie mithilfe von rund dreißig Rezeptoren auf der Zelloberfläche wahrnehmen. Die Forschenden haben entdeckt, dass oft schon eine einzige sterbende Zelle ausreicht, um die Neutrophilen herbeizurufen. Welche Alarmstoffe von der Stelle des Gewebeschadens oder den toten Zellen die Neutrophilen in dieser frühen Phase anlocken, ist jedoch noch nicht im Detail verstanden.

Damit sich die Neutrophilen im weiteren Verlauf zu einem Schwarm zusammenfinden können, ist nach Lämmermanns Erkenntnissen ein Botenstoff unerlässlich: das Leukotrien B4, kurz LTB4. Aktivierte Neutrophile geben diese Substanz nach außen ab, nehmen sie aber auch dank spezieller Rezeptoren selbst wahr. Dabei registrieren sie Änderungen der LTB4-Konzentration in der Umgebung und wandern in die Richtung zunehmender Konzentrationen. Mehr Neutrophile schütten mehr Leukotrien B4 aus, dadurch

43



Mithilfe eines Stereomikroskops, das einen räumlichen Blick erlaubt, können die Forschenden Gewebeprobe für die weitere Untersuchung vorbereiten.

werden noch mehr Zellen angezogen. Auf diese Weise bilden Neutrophile imposante Schwärme, in denen sich zum Teil mehrere Hundert Zellen an einer geschädigten Stelle im Gewebe zusammenfinden. „Neutrophile sind also keine kompletten Einzelgänger. Sie kommunizieren miteinander, wenn sie einen Schwarm bilden, und agieren somit als Kollektiv“, erklärt Lämmermann. Am Ort der Entzündung „krallen“ sich die Neutrophilen dann förmlich aneinander und bilden einen undurchdringlichen Haufen. Auf diese Weise schirmen sie den Entzündungsherd von der Umgebung ab und können dadurch verhindern, dass sich Bakterien, Pilze und Parasiten im Körper ausbreiten. Gegen die derart umzingelten Erreger können sie nun effektiv vorgehen.

## Immer den Lockstoffen nach

Neben LTB<sub>4</sub> produzieren Neutrophile auch den Botenstoff CXCL2. Auch diese zu den Chemokinen gehörende Substanz wirkt schwarmbildend für diese Zellen. Die Lockstoffe LTB<sub>4</sub> und CXCL2 sowie die von einer Entzündungsreaktion ausgeschütteten Alarmstoffe gehören also zu den zentralen Elementen, die den Schwarm zusammenhalten. „Ein Schwarm Neutrophile folgt einem simplen positiven Rückkopplungsprinzip“, sagt Lämmermann: „Die einzelnen Zellen bewegen sich in Richtung steigender Lockstoffkonzentration. Auf diese Weise kann schon eine kleine

Gruppe immer weitere Zellen anziehen und nach und nach zum Schwarm werden.“ Wenn es an mehreren Stellen im Gewebe „brennt“, dann bilden sich mehrere benachbarte Schwärme, die zum Teil um Mitglieder konkurrieren. Die größeren sind dabei im Vorteil und schlucken einfach die kleineren Kollektive.

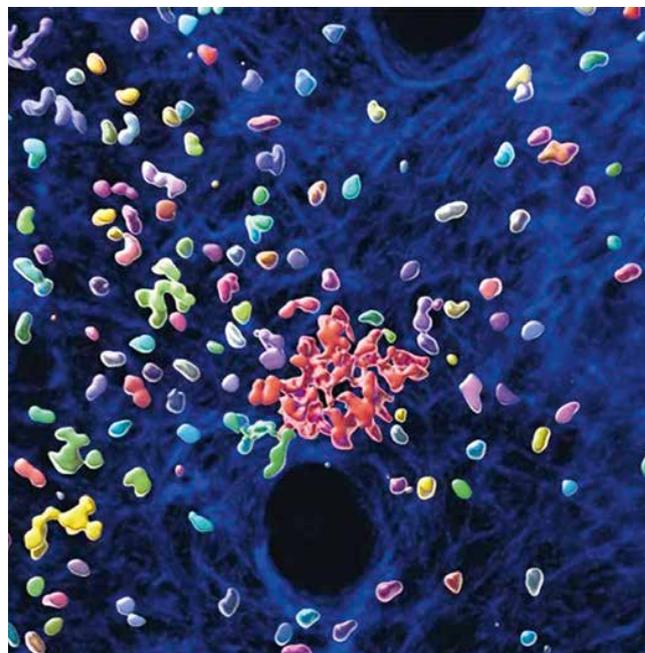
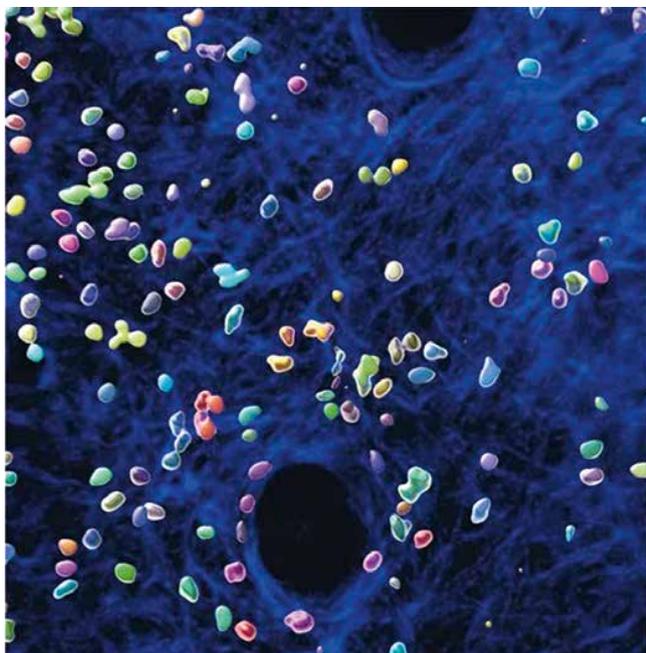
„Die Neutrophilen brauchen folglich keine zentrale lenkende Instanz, sie bilden vielmehr ein sich selbst organisierendes System. In vielerlei Hinsicht ähneln die Neutrophilen-Kollektive durchaus den Schwärmen bestimmter Insektenarten oder auch dem Gruppenverhalten von Schleimpilzen“, sagt Lämmermann. „Unseren Erkenntnissen zufolge halten einzelne Neu-

# „Das Verhalten der Neutrophilen erinnert an die Reaktion der Asiatischen Honigbiene auf einen Hornissenangriff.“

TIM LÄMMERMANN

44

Entzündungsherd in der Haut einer Maus: Einzelne, hier in unterschiedlichen Farben dargestellte Neutrophile ziehen weitere Zellen an und lösen so die Bildung eines Schwarms (rot) aus. Zwischen dem linken Foto und dem Foto ganz rechts liegen 30 Minuten.



trophile jedoch nicht wie Fische und Vögel im Schwarm den Abstand zu ihren Nachbarn ein“, fügt der Wissenschaftler hinzu. Nach einer gewissen Zeit lösen sich die Neutrophilen-Schwärme wieder auf. Dies soll verhindern, dass die Zellen Schaden anrichten, wenn sie in ihrer lokalen Ansammlung etwa Gerüstproteine zerstören und regelrecht Löcher ins Gewebe „fressen“. Eine übers Ziel hinausschießende Immunreaktion wird oftmals bei starken Entzündungen beobachtet und könnte eine der Ursachen für Lungenschäden bei schweren Verläufen von Covid-19 sein. Der Körper muss also die Aktivität der Neutrophilen sehr sorgfältig austarieren.

Tim Lämmermann und sein Team haben sich deshalb in den letzten Jahren verstärkt mit der Frage beschäftigt, was das Wachstum eines Neutrophilen-Schwarms eigentlich beendet. Die Ergebnisse der Forschenden zeigen, dass die Zellen auch dieses Verhalten selbst steuern können und somit eine optimale Balance zwischen den Such- und Zerstörungsphasen im Kampf gegen Krankheitserreger her-

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Manche Immunzellen bilden auf der Jagd nach Krankheitserregern Schwärme aus mehreren Hundert Zellen. Die Zellen geben dabei Substanzen ab, die weitere Zellen anlocken.

Die Zellschwärme sind sich selbst organisierende Systeme, die einem positiven Rückkopplungsprinzip folgen: je höher die Konzentration des Lockstoffs, desto stärker die Anziehung.

Mit der Zeit sinkt die Empfindlichkeit der Immunzellen für ihren eigenen Lockstoff. Auf diese Weise kann sich der Schwarm wieder auflösen, sobald die Immunreaktion beendet ist.

stellen. „Wir haben beobachtet, dass schwärmende Neutrophile mit der Zeit unempfindlich gegenüber ihren eigenen Lockstoffen wie dem Leukotrien B4 werden – also gegenüber jenen Signalen, mit denen sie den Schwarm ursprünglich initiiert haben“, erklärt Lämmermann.

Dieser Befund kam überraschend, denn zuvor hatte man angenommen, Botenstoffe und Signale von anderen Zelltypen im Gewebe würden die Neutrophilen wieder inaktivieren und den Schwarm auflösen. Stattdessen besitzen die neutrophilen Fresszellen eine molekulare Bremse, mit der sie selbst ihre Bewegung stoppen, sobald sie sehr hohe Konzentrationen der sich anhäufenden Lockstoffe wahrnehmen. Die Bremse hört auf den Namen „G-Protein-gekoppelte Rezeptorkinase 2“ – ein Protein, das dafür sorgt, dass die Zellen bei hohen Konzentrationen nicht mehr auf den Lockstoff reagieren. „Dieses Protein bewirkt, dass die von den Rezeptoren an der Zelloberfläche wahrgenommenen Lockstoffsignale ab einem ge-

wissen Punkt nicht mehr ins Zellinnere weitergeleitet werden“, erklärt Lämmermann. Neutrophile ohne diese Bremse reagieren somit ständig auf die Lockstoffe, eilen unablässig im Gewebe umher und suchen dadurch ein viel zu großes Gebiet nach Entzündungen ab. Die meist punktuell wachsenden Krankheitserreger können sie so nicht wirksam bekämpfen. „Anstatt rastlos herumzusuchen, ist es viel effektiver, im Schwarm einen Infektionsherd einzukreisen und abzuschotten“, so Lämmermann.

Die Forschenden haben damit einen wichtigen Aspekt der Immunabwehr gegen Bakterien aufgedeckt. Ihre Erkenntnisse liefern wichtige Impulse für die Erforschung des Kollektivverhaltens anderer Zellverbände bis hin zum Schwarmverhalten höherer Organismen. „Das Verhalten der Neutrophilen erinnert tatsächlich an die Reaktion der Asiatischen Honigbienen auf einen Hornissenangriff. Auch diese Bienen verhalten sich schwarmartig, sobald sie die Substanzen riechen, die von einer verletzten Artgenossin abgegeben werden“, sagt Lämmermann. Pheromone der Arbeiterinnen alarmieren weitere Tiere, die dann der steigenden Pheromonkonzentration folgen und den Eindringling umzingeln. Die „Hitzequelle“ der Bienen ähnelt dabei den Ansammlungen von Neutrophilen, die das antibakterielle Arsenal vieler einzelner Zellen an einem Ort zusammenbringen. Und wie die Immunzellen brauchen auch die Bienen keine Anführerin: Sie riechen, was zu tun ist, und organisieren sich dann einfach selbst.

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

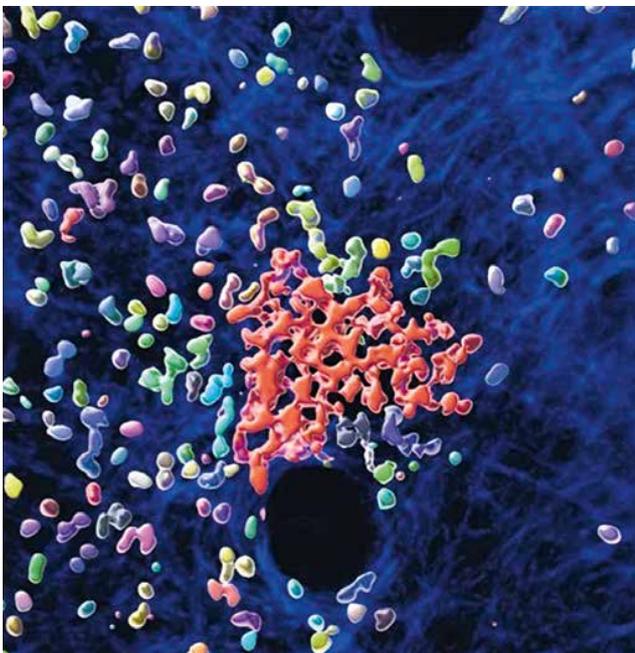


BILD: TIM LÄMMERMANN/MPI FÜR IMMUNBIOLOGIE UND ERGENTIK

Seit zwei Jahren verfügt das Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg über eine neue Abteilung, in der Forschende die Atmosphären von extrasolaren Planeten untersuchen. Ihre junge Direktorin Laura Kreidberg hat mit aufsehenerregenden Beobachtungen von sich reden gemacht und gehört zu den Glücklichen, die mit dem neuen James-Webb-Weltraumteleskop beobachten werden.

TEXT: THOMAS BÜHRKE

46

Als neue Direktorin an ein renommiertes Max-Planck-Institut berufen zu werden, ist eine große Ehre. Doch geschieht dies in Zeiten des Corona-Lockdowns, kann sich ein solcher Schritt als unerwartete Herausforderung erweisen. So geschah es Laura Kreidberg, als sie im Juni 2020 nach Heidelberg kommen wollte. „Schwierig war vor allem die Vorbereitung“, sagt die junge Amerikanerin, „aber glücklicherweise erhielten wir in dieser Zeit sehr viel Hilfe vom Institut.“

Der Verwaltungsleiter besichtigte für sie Wohnungen, der geschäftsführende Direktor schrieb unter anderem ein formelles Dokument, in dem er Kreidbergs Anreise mit einem der wenigen Transatlantikflüge begründete. „Es war anstrengend, aber wir haben es geschafft!“ Mit „wir“ meint die Wissenschaftlerin auch ihren Ehemann, der in Deutschland dank seines Arbeitsgebiets im Bereich Datenwissenschaften rasch eine Anstellung bei einem Start-up-Unternehmen fand. Zwar in Berlin, aber Homeoffice ist wegen Corona mittlerweile Standard. Zum Zeitpunkt ihrer Berufung war Laura Kreidberg gerade einmal dreißig Jahre alt und damit eine der jüngsten Direktorinnen in der Geschichte der Max-Planck-Gesellschaft. Mit ihrem Forschungsfeld „Atmosphärenphysik der Exoplaneten“ schließt sie nahtlos an den Bereich

„Planeten- und Sternentstehung“ an, in dem sich schon seit Langem ein Schwerpunkt auf der Entdeckung und Untersuchung extrasolarer Planeten herauskristallisiert hat. Seit dem spektakulären Fund des ersten Planeten bei einem fernen Stern im Jahr 1995 hat sich kaum ein anderes Gebiet in der astronomischen Forschung so rasant entwickelt wie dieses. Bis heute sind rund 5000 Exoplaneten bekannt.

Die Vielfalt dieser teils sehr exotischen Körper hat die Fachleute überrascht. Es gibt über 1000 Grad heiße Gasplaneten, von denen einige ihrer Zentralsonne so nahe sind, dass sie geradezu verdampfen. Andere sind aus Gestein und vielleicht der Erde ähnlich. Wie genau diese fernen Welten beschaffen sind, welche Temperatur auf ihnen herrscht oder ob sie eine Atmosphäre besitzen und vielleicht das Entstehen von Leben ermöglichen – das sind die Fragen, die Laura Kreidberg faszinieren, ja sie überhaupt zum Astronomiestudium gebracht haben. Denn anders als bei so manchem Kollegen stand bei ihr am Anfang kein Fernrohr, mit dem sie fasziniert den Sternenhimmel beobachtete. „Tatsächlich habe ich bis heute nur ganz selten durch ein Teleskop geschaut“, gesteht sie, und mit den Sternbildern kennt sie sich auch nicht gut aus. „Wenn mich jemand fragt, wo am Himmel sich dieser oder jener Planet befindet, den ich untersucht habe, dann kann ich nur mit den Schultern zucken.“

Aufgewachsen ist die Forscherin in der mittelgroßen Stadt Reno im US-Bundesstaat Nevada, die am ehesten für ihre Spielcasinos bekannt ist. Die Nähe zur Sierra Nevada und zum Lake Tahoe lädt jedoch zu Wanderungen ein – eine Leidenschaft, der Kreidberg bis heute frönt. Auf der Highschool begann sie sich für Physik zu interessieren, weil

→

# BESUCH BEI

---

LAURA  
KREIDBERG



FOTO: ANNA ZIEGLER FÜR MPG

47

Diffiziles Schattenspiel: Zieht ein kleiner Himmelskörper vor seiner Muttersonne vorüber, verdeckt er einen winzigen Teil von deren Oberfläche. Aus der daraus resultierenden Abnahme der Sternhelligkeit lässt sich auf die Existenz eines solchen Exoplaneten schließen. Laura Kreidberg, Direktorin am Max-Planck-Institut für Astronomie, erforscht die geologischen Eigenschaften und Atmosphären dieser Objekte.

sie in diesem Fach „nicht so viele Details lernen musste wie zum Beispiel in Biologie“. Hin und wieder nahm sie an Science Bowls teil, einer Art von wissenschaftlichen Wettbewerben.

In ihrer Familie hatten die Naturwissenschaften zwar keine Tradition, aber populärwissenschaftliche Astronomiebücher ihres Vaters inspirierten sie als Kind zu den wirklich großen Fragen. „Ich erinnere mich, wie ich meine Mutter fragte, wo der Rand des Universums sei“, sagt sie. Auch Bücher von Stephen Hawking und Brian Greene faszinierten sie ungemein, öffneten sie doch den Blick auf ein ebenso geheimnisvolles wie unermessliches Universum. Der stark an der klassischen Physik ausgerichtete Unterricht langweilte und frustrierte sie bald, als ein weiterer Zufall sie in Richtung Astronomie lenkte: Sie wurde auf die Arbeit

sammensetzung der Atmosphäre und das Klima auf einem fernen Planeten zu erforschen, stellt höchste Ansprüche an die Beobachtungstechnik, was mich sehr faszinierte“, erinnert sie sich. „Mir war klar, dass diese Aufgabe das Potenzial hat, mich bis ans Ende meiner Karriere zu fesseln.“

Im Rahmen ihrer Doktorarbeit an der University of Chicago stürzte sich Laura Kreidberg auf das Thema und beobachtete mit dem Weltraumteleskop Hubble einen Planeten, der einen 48 Lichtjahre entfernten Stern namens Gliese 1214 umkreist. Bei diesem Körper mit der Bezeichnung Gliese 1214 b handelt es sich um eine sogenannte Supererde – eine Art von Planeten, die es in unserem Sonnensystem nicht gibt. Gliese 1214 b ist siebenfach schwerer und fast dreifach größer als die Erde, aber kleiner als Neptun.

## „Wir haben sogar schon Planeten gesehen, die um zwei Sterne kreisen, wie Tatooine in *Star Wars*.“

48

ten von Nate Silver aufmerksam – ein Journalist, der mit statistischen Methoden die Ergebnisse von Baseballspielen analysierte und diese Technik später auch auf Präsidentschaftswahlen anwendete. „Ich fand heraus, dass man mit diesen Methoden auch bestimmte Fragen der Astronomie behandeln kann“, so Kreidberg. „Das habe ich dann in meiner Bachelorarbeit getan, in der es um die Massen von schwarzen Löchern ging.“

In dieser Zeit an der Yale University suchte sie nach einem Thema für ihre Doktorarbeit und wurde dabei auch auf Exoplaneten aufmerksam. Diese waren damals sehr populär, doch der Funke sprang zunächst nicht über. Kreidberg war sich nicht sicher, ob diese Forschungsrichtung nicht ein kurzlebiger Trend sei. Ständig wurden neue Körper entdeckt, aber man kannte von ihnen kaum mehr als die Massen und die Abstände zu ihren Zentralsternen.

Dann erfuhr sie davon, dass jemand erstmals die Atmosphäre eines Exoplaneten untersucht hatte. Das war ihr persönliches Aha-Erlebnis. „Die Zu-

Schon zuvor hatten Astronomen versucht, die Atmosphäre von Gliese 1214 b zu analysieren – ohne eindeutiges Ergebnis. Eine Vermutung war, dass die Gashülle überwiegend aus Wasserdampf besteht, weshalb auch der Planet zu einem großen Teil oder ganz von Wasser bedeckt sein könnte – ein Ozeanplanet also. Die neuen Beobachtungsdaten von Kreidberg und Kollegen schlossen dieses Szenario aber weitgehend aus. Die Atmosphäre muss von dichten Wolken bedeckt sein, so der Schluss.

Es folgten Beobachtungen weiterer Exoplaneten, die ein ums andere Mal deren Vielfalt verdeutlichten. In unserem Sonnensystem gibt es die inneren, terrestrischen Gesteinsplaneten und jenseits des Asteroidengürtels die Gasriesen. Die meisten anderen Sonnensysteme sehen nicht so aus. Es existieren viele Planeten, die so nahe um ihre Zentralsterne kreisen, dass ihre Atmosphäre verdampft oder das Gestein zu Lava schmilzt. Im Fall eines extrem heißen Gasplaneten ließen sich Wolken nachweisen, die hauptsächlich aus Metallen wie Eisen, Magnesium, Chrom und Vanadium bestehen. „Wir haben sogar schon Planeten gesehen,

→

Fremde Welten: Mit dem James-Webb-Weltraumteleskop werden die Forschenden erstmals die Atmosphären ferner Gesteinsplaneten untersuchen. Laura Kreidberg hat gleich zwei Beobachtungsanträge erfolgreich durchgebracht. In ihrer Doktorarbeit befasste sie sich mit der sogenannten Supererde Gliese 1214 b; ein weiteres Ziel für James Webb könnte der Exoplanet Gliese 436 b sein, der etwa so groß ist wie Neptun (unten).

GRAFIKEN: NASA, DEEP SPACE NETWORK (OBEN); NASA, ESA, AND A. FEILD AND G. BACON (UNTEN)

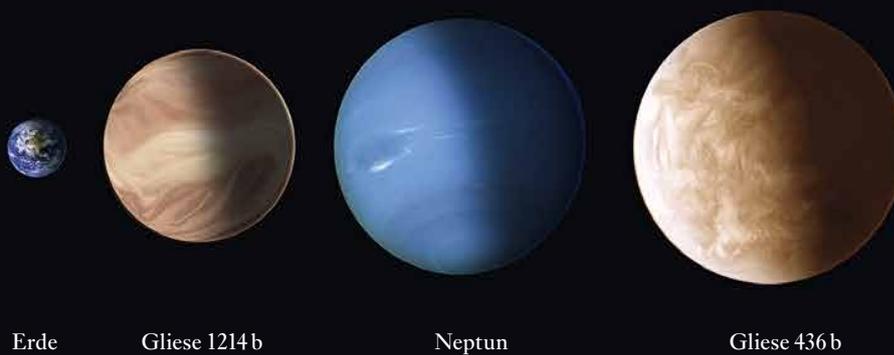
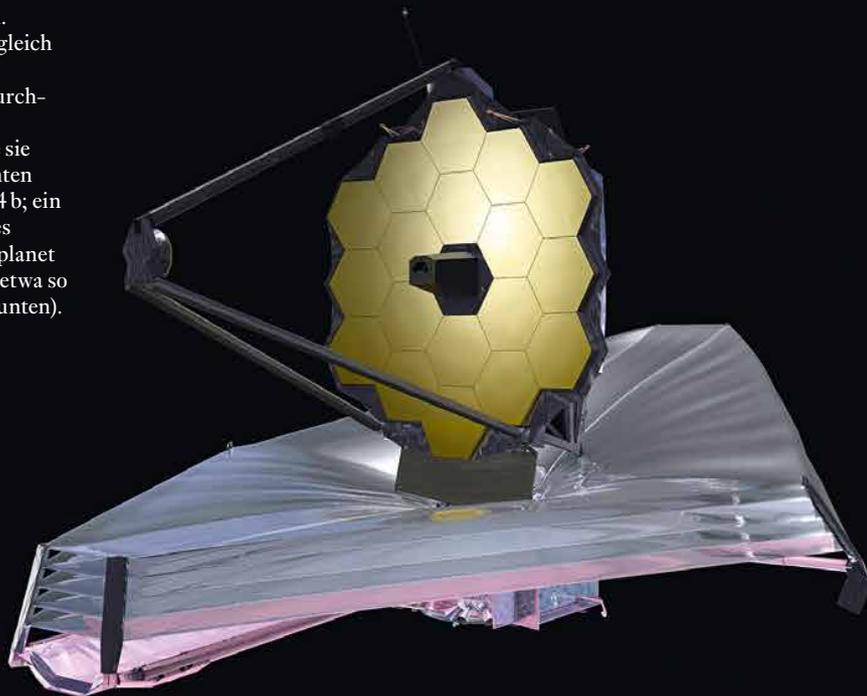




FOTO: ANNA ZIEGLER FÜR MPG

50

Engagiertes Teamwork: Laura Kreidberg legt in ihrer Abteilung viel Wert auf Kommunikation. Hier diskutiert sie mit ihrem Doktoranden Evert Nasedkin.

die um zwei Sterne kreisen, wie Tatooine in *Star Wars*“, sagt Kreidberg. Der Exoplaneten-Zoo ist reich an exotischen Mitgliedern.

Mit ihrer Doktorarbeit und weiteren Veröffentlichungen machte sie von sich reden, erwarb auch einige Preise. Kein Wunder also, dass sie sehr bald unter mehreren attraktiven Stellenangeboten aussuchen konnte, zum Beispiel an der renommierten Harvard University. Ihre Entscheidung für die Direktorenstelle am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg hatte schließlich mehrere Gründe. Hier hat sie die Möglichkeit, langfristig mit festen Mitteln eine eigene Arbeitsgruppe aufzubauen. Sieben von insgesamt fünfzehn bewilligten Stellen sind besetzt, weitere hat sie bereits über Stipendien eingeworben. Der Vorteil: Fachleute aus aller Welt und unterschiedlichen Disziplinen arbeiten unter einem Dach, Beobachterinnen und Beobachter ebenso wie Theoretikerinnen und Theoretiker, die komplexe Atmosphärenmodelle rechnen können. „Die Forschung zu Exoplaneten ist interdisziplinär“, sagt Laura Kreidberg.

Ein weiterer wichtiger Grund war der leichtere Zugang zu den europäischen Großobservatorien, vor allem dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte Eso in Chile. Außerdem wird bis zum Ende dieses Jahrzehnts das dann größte Teleskop der Erde hinzukommen, das Extremely Large Telescope der Eso. Es wird einen Sammelspiegel mit 39 Meter Durchmesser erhalten und damit in der beobachtenden Astronomie ganz neue Maßstäbe setzen. Das Heidelberger Max-Planck-Institut ist am Bau eines Instruments beteiligt, das sowohl Bilder als auch Spektren im Infrarotbereich aufnehmen wird. „Damit ermöglicht es mir die Max-Planck-Gesellschaft, über einen sehr langen Zeitraum mit den weltweit besten Instrumenten beobachten zu können“, sagt Kreidberg.

Doch bevor es so weit ist, wird die Astronomin mit dem neuen Superstar der Szene beobachten, dem James-Webb-Weltraumteleskop. Nach jahrelangen Verzögerungen und Kostensteigerungen gelangte das zehn Milliarden Dollar teure Instrument endlich im Dezember 2021 ins All und erreichte vier Wochen später seinen Bestimmungsort – 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt. Dort, in tiefer Finsternis, soll es die Fähigkeiten des Hubble-Teleskops um ein Vielfaches übertreffen. „Es wird 10 000-mal besser sein“, schwärmt Kreidberg. Der Spiegel, die Abdeckung der Wellenlängen sowie das spektrale Auflösungsvermögen seien jeweils um den Faktor zehn besser. „Durch die Beobachtung im infraroten Licht können wir zu viel kühleren

und damit potenziell bewohnbareren Planeten vordringen als bisher, und wir können auch bestimmte Moleküle in den Atmosphären von Exoplaneten leichter nachweisen.“

Das James Webb ist allerdings ein Allroundgerät, das sich genauso gut für die Untersuchung ferner Galaxien, schwarzer Löcher oder lichtschwacher Kometen eignet. Dementsprechend groß ist die Nachfrage der Forschenden nach Beobachtungszeit. Insgesamt gingen für die 6000 zur Verfügung stehenden Stunden des ersten Beobachtungszyklus 1172 Anträge von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus 44 Ländern ein. Von den schließlich 266 ausgewählten Proposals stammt ein Drittel aus Mitgliedstaaten der Europäischen Weltraumorganisation Esa, die an dem neuen Superteleskop beteiligt ist.

Laura Kreidberg ging aus diesem Wettbewerb besonders erfolgreich hervor: Das internationale Komitee genehmigte gleich zwei ihrer Anträge. „Ich hatte sogar vier Anträge geschrieben, das war wirklich eine harte Zeit“, sagt sie. In den Anträgen mussten sämtliche Details bis ins Letzte ausgearbeitet sein. „Einen Monat lang saß ich mit dem Laptop zu Hause und füllte die Anträge aus, während mein Mann mich mit Eiscreme versorgte.“ Arbeit und Eiskosten haben sich gelohnt. Bisher ließen sich Atmosphären nur auf heißen Planeten von der Größe des Jupiters nachweisen, weswegen diese Himmelskörper auch heiße Jupiter genannt werden. Das James-Webb-Weltraumteleskop soll nun den Durchbruch schaffen und auch Atmosphären von kleineren Gesteinsplaneten zugänglich machen. Das Problem besteht in allen Fällen darin, dass der Stern millionenfach heller ist als der nahe Planet und diesen überstrahlt.

Dies ist auch der Fall bei einem Exoplaneten namens Trappist-1c, den Kreidberg für ihre Beobachtungen mit dem Weltraumobservatorium ausgewählt hat. Dieser 40 Lichtjahre entfernte Gesteinsplanet ist nur wenig größer als die Erde, umkreist seinen Stern aber in so geringem Abstand, dass auf ihm eine Temperatur herrscht, die jener auf der Venus ähnlich ist. „Dieser Planet ist die kühlfeste felsige Welt, die wir mit James Webb nachweisen können“, sagt die Astronomin. „Wir wollen herausfinden, ob er eine Atmosphäre besitzt.“

Das geschieht in einem ersten Schritt auf indirekte Weise, weil sich Stern und Planet selbst mit James Webb nicht getrennt beobachten lassen. Im Infrarotbereich, in dem der Planet Wärmestrahlung ausstrahlt, wird die Helligkeit von Stern und Planet ge-

—>

meinsam gemessen. Dann ein zweites Mal, wenn der Planet hinter dem Stern vorbeizieht und seine Strahlung vom Stern blockiert ist. Aus der Änderung der Gesamthelligkeit lässt sich die Helligkeit des Planeten ermitteln, und daraus ergibt sich seine Temperatur. Diese hängt stark davon ab, ob eine Atmosphäre vorhanden ist oder nicht. Ohne Atmosphäre trifft das gesamte Sternenlicht auf eine Hemisphäre und erhitzt diese sehr stark. Ist der Planet aber von einer dicken Atmosphäre umgeben, so transportiert die Gashölle die Wärme von der heißen Tag- zur kühleren Nachtseite und sorgt so für einen Ausgleich. Mit Atmosphäre ist die Tagseite nicht so heiß wie ohne. Eine solche Messung liefert also einen indirekten Hinweis auf eine Atmosphäre.

vulkanischen Basalten, erstarrten Magmaflächen und Granit fahnden – Indikatoren für die Wiederaufbereitung der Kruste und der Tektonik. „Außerdem wollen wir nach Schwefeldioxidspuren als Folge von vulkanischen Ausgasungen suchen.“

Das große Ziel dieser Forschung ist der Nachweis von Biosignaturen in der Atmosphäre. Am häufigsten genannt wird hier die gleichzeitige Anwesenheit von Sauerstoff und Methan. Normalerweise reagieren diese Gase schnell miteinander zu Kohlendioxid und Wasser. „Wenn wir die beiden Gase gleichzeitig sehen, bedeutet das also, dass sie ständig von irgendetwas produziert und nachgeliefert werden, und dieses Etwas ist auf der Erde das Leben“, sagt

## „Wir wollen nach Schwefeldioxidspuren als Folge von vulkanischen Ausgasungen suchen.“

52

Sollte diese Beobachtung auf die Existenz einer Atmosphäre hindeuten, würde Kreidberg für die nächste Runde mit James Webb eine ergänzende Messung beantragen. Dieses Mal mit einem Spektrografen. Wenn der Planet vor dem Stern vorbeizieht, durchquert ein Teil des Lichts die Planetenatmosphäre, deren Moleküle in einem Spektrum ihre Fingerabdrücke hinterlassen. „Auf diese Weise können wir feststellen, ob die Atmosphäre zum Beispiel Wasser, Methan oder Kohlendioxid enthält“, so die Forscherin.

Da die Aufnahme eines Spektrums zeitaufwendig ist, wird sie erst angefertigt, wenn die vorherige Helligkeitsmessung bestätigt hat, dass überhaupt eine Atmosphäre existiert. Ein kuriozes Detail hat die Astronomin erst in Heidelberg erfahren. Der Farbfilter, durch den Trappist-1c aufgenommen wird, ist Teil eines Filtrerrads, dessen Mechanik das Max-Planck-Institut entwickelt und gebaut hat. „Noch ein Grund mehr dafür, dass ich hierhergekommen bin“, sagt Kreidberg schmunzelnd.

Der zweite Gesteinsplanet, LHS 3844b, ist ebenfalls etwas größer als die Erde, aber rund 770 Grad heiß und besitzt vermutlich keine Atmosphäre. In diesem Fall geht es darum, erstmals die geologischen Verhältnisse eines terrestrischen Planeten zu verstehen. Mit James Webb will Laura Kreidberg nach

die Max-Planck-Direktorin. An dieser Aufgabe allerdings wird voraussichtlich selbst James Webb scheitern. Insbesondere Sauerstoff hinterlässt nur eine sehr schwache spektroskopische Signatur. Zudem erschweren Wolken in der Atmosphäre solche Beobachtungen.

Die Frage, welche weiteren Biomarker es geben könnte, ist zurzeit hochaktuell. So wissen wir, dass die Erdatmosphäre bis vor etwa 600 Millionen Jahren kaum Sauerstoff enthielt, dass aber sehr wohl Leben existierte, wenn auch primitives. Die damalige Atmosphäre besaß also andere Biomarker als die heutige. Vielleicht sind diese in den kommenden Jahren auf anderen Planeten nachweisbar.

Die Wissenschaftlerin ist jedenfalls überzeugt davon, dass irgendwo da draußen Leben existiert. Auch hier könnte es – wie bei den Exoplaneten – eine wesentlich größere Vielfalt geben, als wir es uns vorstellen. „Für die Suche nach Lebensmerkmalen in den Atmosphären ferner Planeten benötigen wir noch bessere Teleskope – und Geduld“, resümiert die Astronomin. Bei Nasa und Esa hat die Suche nach Biomarkern oberste Priorität. Es laufen bereits Planungen für Weltraumteleskope der nächsten Generation, die vielleicht in den 2040er-Jahren starten könnten. „Das wäre dann noch im Laufe meiner Karriere“, sagt Laura Kreidberg und lacht.



# FORSCHUNG LEICHT GEMACHT

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

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

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

KOSTENLOS  
DOWNLOADEN!



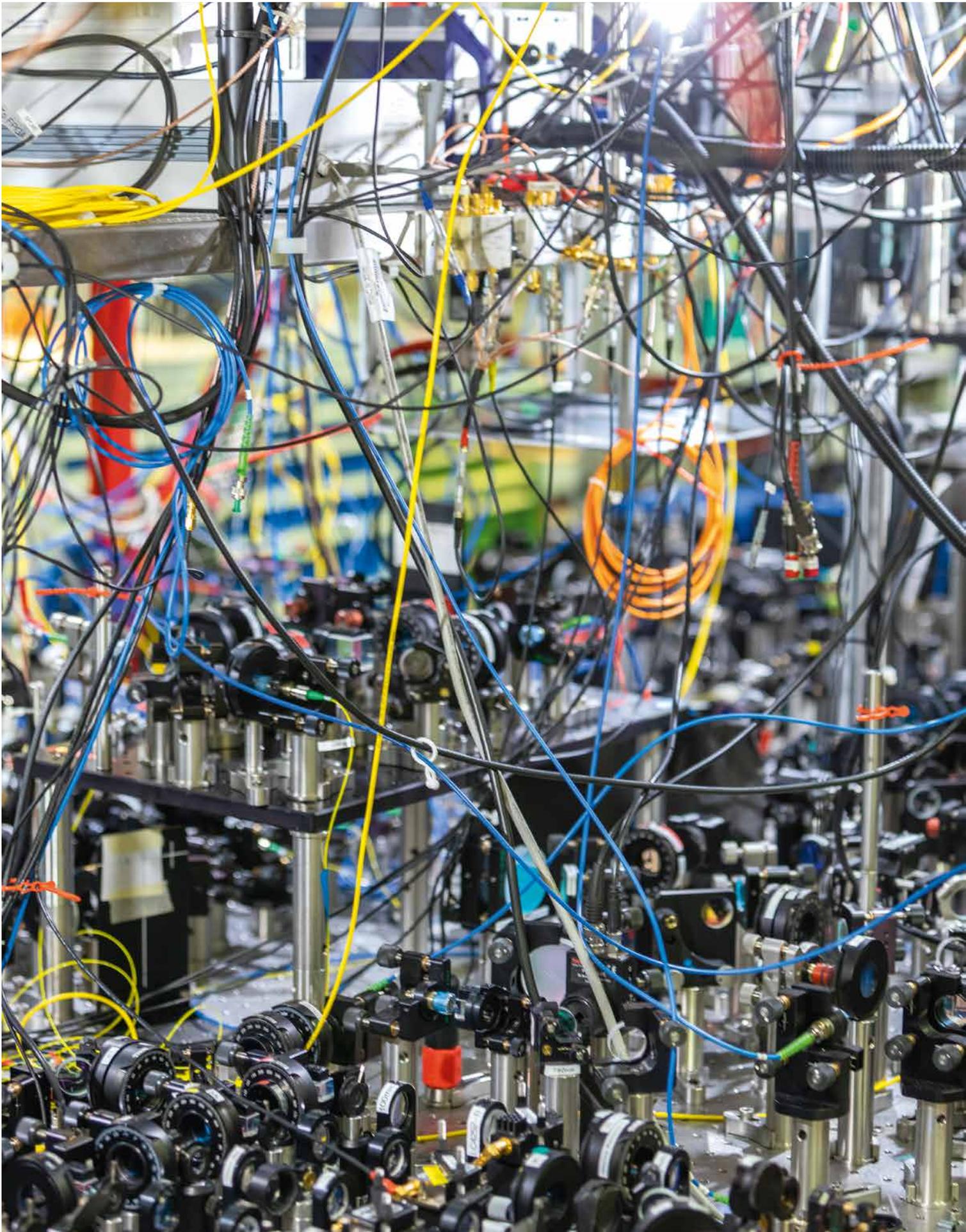


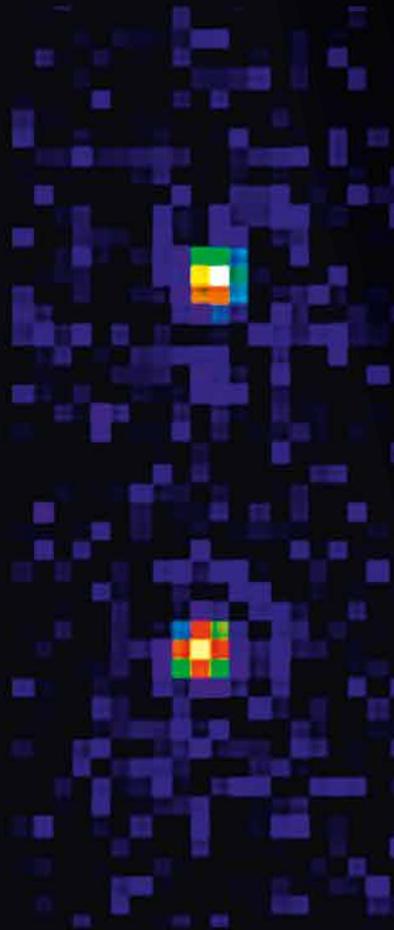
FOTO: AXEL GRIESCH

# ZWEITER BLICK

*MAX-PLANCK-INSTITUT  
FÜR QUANTENOPTIK*

Je kleiner das Forschungsobjekt, desto aufwendiger die Apparatur: Ein solches Gewirr aus bunten Glasfaser- und schwarzen Stromkabeln, aus Lasern, zahlreichen Spiegeln und anderen optischen Instrumenten ist nötig, um einzelne Atome zu handhaben.

So lassen sich zwei Atome (diese Seite) in einem Resonator, einem winzigen Hohlraum zwischen zwei Spiegeln, positionieren, manipulieren und abbilden. Atome in Resonatoren könnten als Schaltstellen in einem Quanteninternet dienen, in dem Quanteninformation abhörsicher über Glasfasern ausgetauscht wird.



# SCHLARAFFENLAND IM MITTELMEER

TEXT: KLAUS WILHELM

56

Am Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie lüften die Abteilungen von Marcel Kuypers und Nicole Dubilier die Geheimnisse von Seegraswiesen. Mit erstaunlichen Entdeckungen: Nicht nur an Land, sondern auch im Meer spielen Mikroorganismen eine entscheidende Rolle für Fitness, Produktivität und Stoffflüsse der Pflanzen.

Wer gern im Meer schwimmt oder am Ufer spazieren geht, kennt Seegras vor allem als unangenehmes Strandgut: Die länglichen, graugrünen Blätter werden im Herbst und nach Stürmen oft massenhaft angespült. An der Ostseeküste etwa gehören dicke Seegrasmatten vielerorts zum Strandbild – genauso wie die Bagger, welche die Pflanzenreste beseitigen. Forschende dagegen beginnen gerade erst zu verstehen, welchen Wert die Unterwasserwiesen tatsächlich haben.

Seegraswiesen sind weltweit in den flachen Küstenregionen gemäßigter und tropischer Meere verbreitet. Mit insgesamt etwa 600 000 Quadratkilometern bedecken sie eine Fläche größer als jene Frankreichs. Sie sind die Grundlage für ein Ökosystem, das

vielen Tieren, darunter auch bedrohte Arten wie etwa Meeresschildkröten, Seepferdchen und Seekühe, ein Zuhause ist und etlichen Fischarten eine sichere Kinderstube bietet.

Seegräser zählen zu den Blütenpflanzen und bilden, im Gegensatz zu Algen, echte Wurzeln aus. Dadurch sind sie fest im Meeresboden verankert und schützen die dahinterliegenden Küsten vor Erosion. Seegraswiesen produzieren jede Menge Sauerstoff und nehmen außerdem jedes Jahr Millionen Tonnen an Kohlendioxid auf, das sie als sogenannten blauen Kohlenstoff – *blue carbon* – einlagern.

Die Wiesen unter Wasser haben daher nicht nur eine immense ökologische Bedeutung. Sie spielen auch eine wichtige Rolle im globalen Klimageschehen. Bis vor Kurzem aber war nur wenig über die damit assoziierten Mikroorganismen bekannt. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie in Bremen haben nun in ihren gemeinsamen Arbeiten Licht ins Dunkel gebracht. Ihre Expeditionen ins Mittelmeer liefern erstaunliche neue Erkenntnisse. Insbesondere die Frage, wie die Kohlenstoffspeicherung im Meer überhaupt abläuft,

war lange Zeit ungeklärt. Die Abteilung „Symbiose“ des Bremer Max-Planck-Instituts unter der Leitung von Direktorin Nicole Dubilier ist jetzt einem Mechanismus auf die Spur gekommen. Forschungsgruppenleiter Manuel Liebeke hatte vor einigen Jahren das Metabolom darmloser Würmer analysiert, die in einer Seegraswiese vor Elba im Mittelmeer heimisch sind. Das Metabolom umfasst alle Moleküle eines Organismus oder Ökosystems, die irgendwie mit dem Stoffwechsel zu tun haben – Aminosäuren, Zucker, Fette und viele mehr. Zur großen Verwunderung aller wies der Forscher in den Würmern riesige Mengen an pflanzlichen Zuckern nach. Woher konnten diese stammen?

„Wir haben vermutet, dass die Zucker aus dem Seegras kommen“, sagt Liebeke. Um dem nachzugehen, entnahmen die Forschenden an mehreren Orten Wasser aus der Wurzelumgebung von Seegräsern – vor Elba, aber auch in der Karibik. „Wir gehen mit einer dünnen Metallnadel ins Sediment und holen mit einer Art langer Spritze Porenwasser aus verschiedenen Regionen neben und unter dem Seegras heraus“, beschreibt der Wissenschaftler das Vorgehen. Die Proben werden dann zur Analyse möglichst schnell tiefge-



# WISSEN AUS

— BIOLOGIE & MEDIZIN

Spielwiese für Meeresfor-  
schende: Wissenschaftle-  
rinnen und Wissenschaft-  
ler des Bremer Max-  
Planck-Instituts für  
marine Mikro-  
biologie untersuchen  
Seegrasfelder der Art  
*Posidonia oceanica* vor der  
Küste Elbas.

kühlt ins Bremer Labor verfrachtet. Die Crux: Das Salz im Meerwasser würde die Messungen der Stoffwechselprodukte in der Probe stören.

Federführend hat Dubilier's damalige Mitarbeiterin Maggie Sogin daher ein Verfahren entwickelt, um zunächst das störende Salz zu entfernen. Danach wandert die Probe in ein Analysegerät: einen Gaschromatografen mit gekoppeltem Massenspektrometer. Die Maschine fertigt eine Art Schnappschuss der chemischen Verbindungen in der Porenwasserprobe an. So wird ersichtlich, welche Moleküle darin vorhanden sind und in welchen Mengen. „In unseren Porenwasserproben war immer ein Riesenpeak zu sehen, der von dem Zucker Saccharose herrührte“, sagt Sogin, die mittlerweile an der Universität von Kalifornien, Merced, tätig ist. Noch niemals zuvor waren im Meer solche Zuckermassen nachgewiesen worden: „Es ist achzigmal mehr als sonst in Meerwasser üblich“, erklärt Nicole Dubilier. Um das global einzuordnen: Die Forschenden schätzen, dass in den Böden unter allen Seegraswiesen der Ozeane eine Million Tonnen Saccharose stecken – ein gigantischer Berg Zucker.

58

## Ein Überlaufventil für Energie

Physiologisch gesehen ist die Freisetzung von Zucker durch das Seegras höchstwahrscheinlich ein Mechanismus, um einen Überschuss an Energie zu bewältigen – ähnlich einem Überlaufventil. Nur: Wie kann es sein, dass sich in einem Ökosystem so viel Saccharose anhäuft? In den zumeist sauerstoffreichen Umgebungen an Land stürzen sich sofort Heerscharen von Mikroorganismen auf den Zucker und bauen ihn ab. Der größte Teil des Bodens im Wurzelbereich von Seegraswiesen – die sogenannte Rhizosphäre – ist dagegen frei von Sauerstoff. Doch gibt es unter den Mikroben genügend Spezialisten, die auch damit zurechtkommen. Es hat eine Weile gedauert, bis die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf des Rätsels Lösung kamen. Geholfen hat ihnen dabei eine Erkenntnis aus ihrer

Innige Partnerschaft: Die Mikroskopaufnahmen zeigen einen Querschnitt durch eine Seegraswurzel (oben) und einen Ausschnitt aus dem Wurzelinneren (unten), auf dem die Symbionten zu erkennen sind (in Pink).

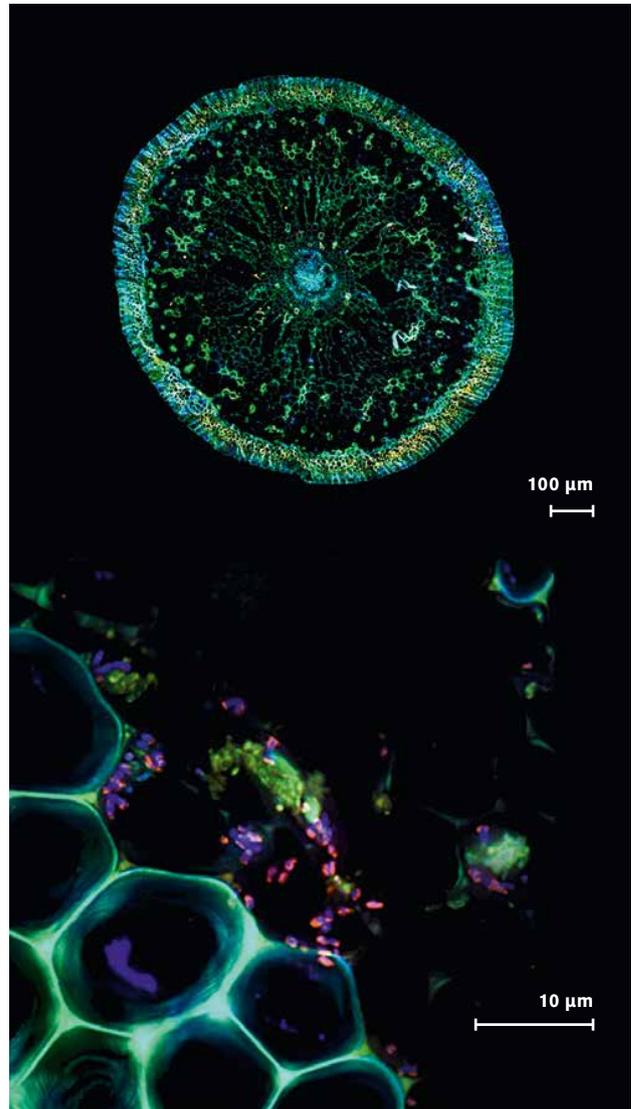


BILD: MPI FÜR MARINE MIKROBIOLOGIE / DANIELA TIENKEN / SOEREN AHMEKAMP

Wurmforschung. Denn einer ihrer Kollegen hatte herausgefunden, dass einige der mikrobiellen Symbionten, die in den darmlosen Würmern leben, Phenole abbauen können – chemische Substanzen, die etwa in Rotwein, dunkler Schokolade, Tee oder Beeren vorkommen und für ihre keimtötenden Eigenschaften bekannt sind. Dies brachte die Bremer auf die richtige Spur: Produziert das Seegras womöglich Phenole, die verhindern, dass Bakterien den Zucker wegfuttern? Die Forschenden starteten eine Reihe von Experimenten, die eindeutig belegen: Das Seegras produziert tatsächlich Phenole und gibt sie, wie auch den Zucker, ins Sediment ab! Die Substanzen hindern viele Bakterienarten da-

ran, die Saccharose zu verwerten. Einige Mikroorganismen haben sich jedoch an die sauerstoffarme, aber phenolreiche Situation angepasst und können den Zucker trotzdem nutzen. Dank dieser Fähigkeit leben sie wie im Schlaraffenland, ohne ernsthafte Konkurrenz.

Das Team der Abteilung „Biogeochemie“ unter der Leitung von Direktor Marcel Kuypers erforscht Seegraswiesen schon seit ungefähr zehn Jahren. Kuypers' Mitarbeiterin Wiebke Mohr und ihre Kolleginnen und Kollegen haben kürzlich die Ursache gefunden, warum das Seegras im Mittelmeer trotz Nährstoffarmut ausgezeichnet gedeihen kann: Es pflegt in seinen Wurzeln

eine Symbiose mit einem Bakterium, das den Pflanzen den nötigen Stickstoff liefert. Der Lebensraum vieler Seegräser ist für den Großteil des Jahres arm an Nährstoffen. In seiner molekularen Form ist Stickstoff im Meer zwar reichlich vorhanden, die Seegräser können ihn jedoch so nicht aufnehmen. Dass die Pflanzen dennoch üppig gedeihen, liegt an ihren mikroskopisch kleinen Helfern: Diese fixieren den gelösten Stickstoff innerhalb der Wurzeln und stellen ihn den Pflanzen in nutzbarer Form zur Verfügung. Wie diese innige Beziehung zwischen Seegras und Bakterium organisiert ist, untersuchte das Bremer Team gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen von Hydra Marine Sciences in Bühl und dem Schweizer Wasserforschungsinstitut Eawag. Bis dahin vermutete man, dass der fixierte Stickstoff von Bakterien stamme, die im Sediment der Rhizosphäre leben. „Wir haben nachgewiesen, dass diese Beziehung wesentlich enger ist“, sagt Mohr. „Die Bakterien leben direkt in den Wurzeln der Seegräser.“

## Bakterien, die Stickstoff fixieren

Es ist das erste Mal, dass eine derart enge Symbiose mit Stickstoff fixierenden Bakterien bei Seegräsern gezeigt wurde. Bisher war sie nur von Landpflanzen bekannt: Vor allem landwirtschaftlich wichtige Arten wie Hülsenfrüchte, Weizen oder Zuckerrohr lassen sich den Luftstickstoff von Bakterien aufbereiten und liefern diesen im Gegenzug Kohlenhydrate und andere Nährstoffe. Ein ganz ähnlicher Austausch von Stoffwechselprodukten findet auch zwischen dem Seegras und seinen Symbionten statt.

Die Bakterien, die in den Pflanzenwurzeln leben, sind eine Neuentdeckung. Mohr und ihr Team gaben ihnen den Namen *Celerinatantimonas neptuna*, nach ihrem Gastgeber, dem Neptungras (*Posidonia oceanica*). Verwandte von *C. neptuna* wurden auch schon bei Meeresalgen gefunden, etwa beim Seetang. „Vor etwa hundert Millionen Jahren haben Seegräser vom Land aus das Meer besiedelt. Damals haben sie

wohl die Bakterien von den großen Algen übernommen“, vermutet Wiebke Mohr: „Sie haben das an Land höchst erfolgreiche System kopiert. Um im nährstoffarmen Meerwasser überleben zu können, haben sie sich marine Symbionten zugelegt.“ Die Studien des Bremer Teams schlagen eine Brücke über das gesamte Ökosystem, von der Produktivität des Seegrases bis hin zu den dafür verantwortlichen Symbionten im Wurzelwerk. Die Forschenden nutzen dafür eine Vielzahl von Untersuchungsmethoden: Sauerstoffmessungen vor Ort verraten die Produktivität der Seegraswiese. Spe-

---

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Seegräser stellen riesige Mengen an Saccharose her, die sie im Sediment einlagern. Dieser Zucker bildet ein riesiges Kohlenstoffreservoir, das klimaschädliches Kohlendioxid speichert.

In ihren Wurzeln beherbergen die Seegräser symbiotische Bakterien, welche die Pflanzen mit lebensnotwendigem Stickstoff beliefern.

Andere Mikroben tragen dazu bei, dass in den Sedimenten der Seegraswiesen das Treibhausgas Methan produziert wird. Dieses wird sogar dann noch freigesetzt, wenn die Pflanzen bereits abgestorben sind.

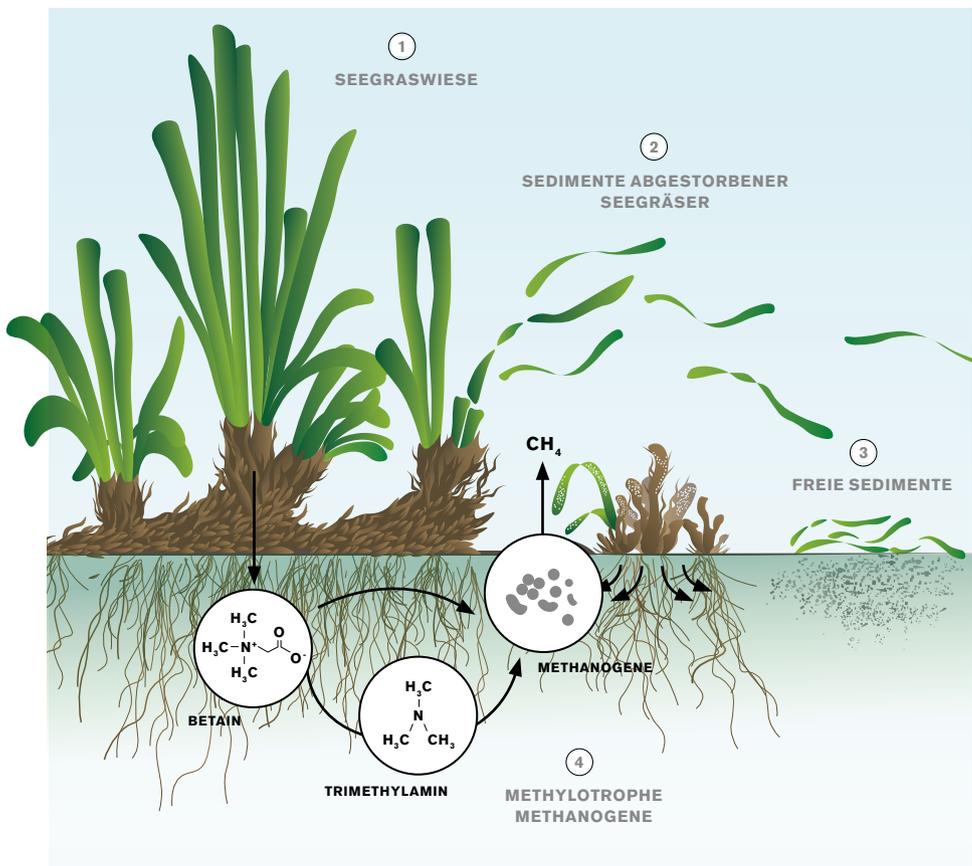
---

zielle Mikroskopietechniken wie die Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH) ermöglichen es, einzelne Bakterienarten farbig zu markieren und die Symbionten zwischen den Wurzelzellen der Seegräser zu lokalisieren. Im NanoSIMS, einem hochmodernen Massenspektrometer, lässt sich die Aktivität der Bakterien nachweisen. Genom- und Transkriptomanalysen zeigen, welche Mechanismen für die

Interaktion zwischen Wirt und Symbiont wahrscheinlich wichtig sind.

So gelang auch der Nachweis, dass die Lebensgemeinschaft im Seegras einen jahreszeitlichen Rhythmus pflegt – abhängig von der Nährstoffmenge in den Küstengewässern, die saisonal variiert. Im Winter und Frühjahr reichen die in Wasser und Sediment enthaltenen Nährstoffe den Seegräsern aus. „Die Symbionten sind dann zwar vereinzelt in den Wurzeln der Pflanzen vorhanden, aber wahrscheinlich nicht sehr aktiv“, sagt Mohr. Im Sommer, wenn das Sonnenlicht zunimmt, wachsen immer mehr Algen und zehren die Nährstoffe auf. Dann wird auch der Stickstoff knapp. In dieser Phase übernehmen die Symbionten und liefern den Seegräsern den nötigen Stickstoff. So ist es möglich, dass diese im Sommer, wenn doch eigentlich karge Zeiten anbrechen, ihr größtes Wachstum zeigen.

Für den Kohlenstoffkreislauf und damit auch für das Klima spielen Seegraswiesen eine wichtige Rolle, da sie zum einen sehr produktive Ökosysteme sind, zum anderen aber auch natürliche Quellen von Methan. Als Doktorandin in der Forschungsgruppe „Treibhausgase“ unter der Leitung von Jana Milucka untersucht Sina Schorn die Aktivität Methan produzierender Mikroorganismen, unter anderem in den Seegraswiesen des Mittelmeers. Denn während ihres Wachstums bilden Seegräser, so wie ihre Verwandten an Land, große Torfablagerungen unter der Sedimentoberfläche. Terrestrischer Torf setzt beim mikrobiellen Abbau des organischen Materials große Mengen an Methan frei. Dasselbe passiert auch unter Wasser: Methan, der einfachste Kohlenwasserstoff, ist ebenfalls ein Treibhausgas, und zwar ein weitaus potenteres als Kohlendioxid. Damit haben Seegraswiesen neben ihrer klimaschützenden auch eine klimaschädliche Wirkung, die den *Blue-carbon*-Effekt teilweise kompensiert. Wie das Methan gebildet wird, war lange Zeit unklar. Sina Schorn und ihre Kolleginnen und Kollegen vermuteten zunächst, dass das Gas in Seegraswiesen genauso produziert wird wie in terrestrischen Ökosystemen. Umso größer war die



### Methanproduktion in Seegraswiesen

- 1) Neptungras (*Posidonia oceanica*) produziert eine Vielzahl von methylierten Verbindungen, die von Mikroorganismen abgebaut werden. Dabei entsteht Methan ( $\text{CH}_4$ ).
- 2) Pflanzenteile in den Sedimenten abgestorbener Seegraswiesen setzen über lange Zeiträume methylierte Verbindungen frei.
- 3) Losgelöste Seegrasblätter, die sich auf freien Sedimenten ablagern, sind ebenfalls eine Quelle für methylierte Moleküle.
- 4) Im Sediment lebt eine vielfältige Gemeinschaft von Mikroben – sogenannte methylophile Methanogene –, die Methan direkt aus methylierten Verbindungen (etwa Betain) oder aus deren Abbauprodukten (wie Trimethylamin) freisetzen.

GRAFIK: GCO NACH SCHORN, S., AHMERKAMP, S., ET AL. DIVERSE METHYLOTROPHIC METHANOGENIC ARCHAEA CAUSE HIGH METHANE EMISSIONS FROM SEAGRASS MEADOWS. PNAS, VOL. 119 | NO. 9, MARCH 1, 2022

60

Überraschung, als die Forschenden die Mechanismen der Methanproduktion genauer unter die Lupe nahmen: „In den Sedimenten der Seegraswiesen entsteht Methan nur aus einer bestimmten Gruppe organischer Verbindungen“, erklärt die Mikrobiologin. Diese sogenannten methylierten Verbindungen stellt die Seegraspflanze selbst her. Spezialisierte Mikroorganismen – die methanogenen Archaeen – erledigen dann die Umwandlung zu Methan.

## Methan aus totem Pflanzengewebe

Zu den methylierten Verbindungen zählt beispielsweise Betain – ein Molekül, das Seegräsern hilft, mit dem schwankenden Salzgehalt des Meerwassers klarzukommen. Da methanogene Mikroorganismen diese Verbindungen direkt nutzen können, ist die Methanproduktion in den Seegraswiesen höchst effizient, und das Methan wird sehr schnell freigesetzt. Wie durch einen Strohhalm gelangt das Gas durch

das Pflanzengewebe aus dem Meeresboden ins Wasser. Weil Seegräser nur in flachen Meeresgebieten wachsen, haben Mikroorganismen dort kaum Gelegenheit, das Methan abzubauen, ehe es in die Atmosphäre entweicht. „Zudem wird das Methan aus dem Sediment durch die Bewegungskraft der Wellen regelrecht ausgewaschen“, sagt Jana Milucka.

Im Zuge ihrer Studie beprobten die Bremer Forschenden neben produktiven Seegraswiesen auch eine, die bereits abgestorben war. Dabei erlebten sie eine weitere Überraschung: „Die Raten der Methanproduktion waren dort ähnlich hoch wie in einer intakten Seegraswiese“, erzählt Jana Milucka. „Der Grund für diese anhaltende Methanfreisetzung ist vermutlich, dass die methylierten Verbindungen sehr lange im Gewebe der Pflanzen erhalten bleiben.“ Sie fanden sich sogar noch in Pflanzengewebe, das bereits vor mehr als zwei Jahrzehnten abgestorben war.

Zusammengenommen zeigen die Erkenntnisse der Bremer Wissenschaft-

lerinnen und Wissenschaftler, dass Seegraswiesen eine wichtige, bislang weit unterschätzte Rolle im Klimageschehen spielen. Gleichzeitig sind die Wiesen unter Wasser akut bedroht: Als küstennahe Lebensräume sind sie von den menschengemachten Veränderungen besonders betroffen. Vor allem die Überdüngung der Meere durch Landwirtschaft und Aquakultur setzt ihnen zu. Große Mengen an Phosphor und Stickstoff führen zu übermäßigem Algenwachstum. Die Seegräser erhalten dadurch nicht mehr genügend Licht und sterben ab. Hinzu kommen immer mehr Freizeitboote, die auf Seegraswiesen ankern und Löcher in den Bewuchs reißen, die sich kaum wieder schließen. Mit einer Wachstumsrate von wenigen Zentimetern pro Jahr regenerieren sich die Unterwasserwiesen nur sehr langsam.

Die größte Bedrohung aber ist die Erderwärmung: Neptungras etwa reagiert sehr empfindlich auf Hitze. Schon wenige Grad mehr erzeugen bei den Pflanzen physiologischen Stress und erhöhen die Absterberate. „Derzeit er-

leben wir weltweit ein Absterben von Seegraswiesen, mit verheerenden Auswirkungen auf die Küsten“, sagt Jana Milucka. Für das Klima ist das in zweifacher Hinsicht fatal: „Unsere Ergebnisse zeigen, dass nach dem Absterben der Pflanzen kein Kohlendioxid mehr aus der Atmosphäre gebunden und im Sediment als blauer Kohlenstoff gespeichert wird. Zusätzlich wird weiterhin Methan freigesetzt.“

## Küstenregionen als Kohlenstoffspeicher

Die neuen Erkenntnisse machen deutlich, dass Seegraswiesen weit größere Aufmerksamkeit verdienen, als ihnen bisher zuteilwurde. Die Bremer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten weiterhin über mehrere Gruppen hinweg eng zusammen, um das Verständnis dieses faszinierenden Lebensraums zu verbessern. Innerhalb der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) beteiligt sich das Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie an verschiedenen Projekten, die Küstenregionen in den Fokus rücken – indem sie etwa untersuchen, wie viel Kohlenstoff die Seegraswiesen an deutschen Küsten speichern können. Mehrere Institutionen haben sich dazu im Projekt sea4soCiety zusammengeschlossen.

Die Max-Planck-Forschenden Manuel Liebeke und Jana Geuer sind daran beteiligt. Sie analysieren, welche kohlenstoffhaltigen Substanzen die Pflanzen produzieren und ins Wasser abgeben: „Wir haben bereits Hunderte unterschiedlicher Verbindungen gemessen“, sagt Liebeke. Als Nächstes wollen sie herausfinden, wie stabil diese Moleküle unter Stress sind, beispielsweise unter starkem UV-Licht oder bei erhöhten Temperaturen. Für das weitere Schicksal des Kohlenstoffs ist das entscheidend: „Die Idee ist, gezielt solche Küstenökosysteme zu fördern, die langfristig möglichst viele stabile Kohlenstoffverbindungen produzieren“, erklärt Liebeke. Auch eine Wiederaufforstung zerstörter Flächen wäre denkbar, wenn die Beschaffenheit der Küsten es zulässt. Mit weit-sichtiger Planung gewährleisten die

Bremer Forschenden auch die Zukunft ihrer Forschung an Seegraswiesen. Zu diesem Zweck wurde im westlichen Mittelmeer, auf der Urlaubsinsel Mallorca, gerade eine neue Forschungskoope-ration ins Leben gerufen. Von der Max-Planck-Gesellschaft mit einer halben Million Euro gefördert, wird der Leuchtturm von Portocolom in Zukunft als Außenposten der Bremer Seegrasforschung fungieren. Gemeinsam mit dem spanischen Meeresforschungsinstitut Imedea in Esporles planen die deutschen und mallorquinischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zukünftig Langzeitbeobachtungen und Detailstudien an den Seegräsern und an den vielen Bewohnern dieses Lebensbereichs. Denn wie das Bremer Max-Planck-Institut eindrucksvoll gezeigt hat, zählen beim Klimaschutz längst nicht nur die Wälder an Land – sondern auch marine Ökosysteme wie die Wiesen unter Wasser.

←

---

## GLOSSAR

### ARCHAEEN

Einzellige Mikroorganismen ohne Zellkern. Neben den Bakterien und den Eukaryoten bilden sie eine dritte Lebensdomäne innerhalb der Biologie.

### BLAUER KOHLENSTOFF (BLUE CARBON)

Jener Kohlenstoff, den der Ozean sowie Meeres- und Küstenökosysteme aufnehmen und speichern.

### RHIZOSPHÄRE

Bereich des Bodens, der von den Pflanzenwurzeln unmittelbar beeinflusst wird.

### SACCHAROSE (ROHRZUCKER)

Zweifachzucker aus je einem Molekül Glukose und Fruktose.

---

Aus dem Meer ins Labor: Sina Schorn untersucht Proben von Neptungras (*Posidonia oceanica*), die vor der Küste Elbas gesammelt wurden. In ihrer Doktorarbeit erforscht sie Methan produzierende Mikroorganismen in Seegraswiesen.



FOTO: ACHIM MULHAUPT FÜR MPG

**Mehr Licht im Schatten:**  
Forschende versuchen  
zu ergründen, nach  
welchen Regeln und  
Normen einzelne  
Migrantengemeinschaften  
in Deutschland leben.

# IM SCHATTEN DES RECHTSSTAATS

TEXT: JEANNETTE GODDAR

In Deutschlands vielfältiger Gesellschaft sorgen nicht nur Polizei und Justiz für Recht und Ordnung. Es gibt Gemeinschaften, die Konflikte mit eigenen Mitteln regulieren: etwa Familienclans mit ausländischen Wurzeln, aber auch Rockerbanden oder Reichsbürger. Hatem Elliesie vom Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung in Halle und Clara Rigoni vom Max-Planck-Institut zur Erforschung von Kriminalität, Sicherheit und Recht sind dem Phänomen auf der Spur.

Schon für seine Promotion machte sich Hatem Elliesie auf der Suche nach dem Recht auf eine ungewöhnliche Reise. Der Jurist, Islam- und Afrikawissenschaftler durchstreifte, teils zu Fuß, mehrere Länder am Horn von Afrika. Ziel: den Vertrag zu finden, mit dem Italien das heutige Äthiopien 1889 zum Protektorat erklärt hatte. Die italienische Fassung ist hinlänglich bekannt, Elliesie ging es jedoch um das amharische Dokument und

die Entwürfe dazu. Mithilfe vieler Tassen Tee und mit Gesprächen in amharischer und tigrinischer Sprache wurde der Schwabe fündig – und wies nach, dass die amharische Ausgabe in wesentlichen Passagen ganz anders formuliert war als die, auf die Italien sich berief.

Das ist lange her. Doch es erklärt recht gut, wie ein Volljurist mit einer Promotion in Semitistik am Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung in Halle inmitten von sozialwissenschaftlichen Feldforschern gleichsam ein natürliches Habitat fand. Seit 2018 leitet Elliesie dort – im Bereich der Direktorin der Abteilung „Recht & Ethnologie“, Marie-Claire Foblets – eine Gruppe, die sich dem deutschen Recht aus vielen Blickwinkeln nähert. Unter dem Projekttitle „Konfliktregulierung in Deutschlands pluraler Gesellschaft“ fragt sie in der deutschen Verwaltung, wie Menschen in Einwanderungsgemeinschaften ihre Probleme und Konflikte lösen: Ge-

hen sie zur nächsten Polizeistation oder vor Gericht? Oder wenden sie sich an Ältestenräte, an Familienväter, an islamische „Friedensrichter“ oder gar an „Clanchefs“?

## Suche nach Opfern und Zeugen

In der Öffentlichkeit ist das Phänomen unter einem knackigen Namen bekannt: Paralleljustiz. Warum also so kompliziert? Der erste Einwand liegt nahe: Laut dem Selbstverständnis des Staates ist der Begriff Justiz seinen Institutionen vorbehalten. Der zweite ist komplexer: „Parallel“ würde bedeuten, die Menschen bewegen sich in völlig getrennten Welten“, erläutert Hatem Elliesie. „So ist es aber nur sehr selten.“ Stattdessen entschieden Menschen von Fall zu Fall, an wen sie sich wenden, abhängig davon, was sie erreichen wollen; auch einzelne Konfliktsituationen würden oft in ge-





Clara Rigoni, Senior Researcher am Max-Planck-Institut zur Erforschung von Kriminalität, Sicherheit und Recht untersucht seit mehr als zehn Jahren, welches Verhältnis Einwanderungsgemeinschaften zu staatlichen Behörden haben.

64

richtliche und außergerichtliche Bestandteile aufgespalten. „Diese Praxis bezeichnet man als *forum shopping*“, erläutert Elliesie. „Und: Sie ist grundsätzlich auch nichts Ungewöhnliches. Wir alle regeln die meisten Alltagskonflikte informell.“

Das ist bereits der erste Widerspruch zu einem Buch, das den Anstoß für das Forschungsprojekt gab. *Richter ohne Gesetz. Islamische Paralleljustiz gefährdet unseren Rechtsstaat* heißt es. Geschrieben hat es Joachim Wagner, vielen bekannt als langjähriger Moderator des NDR-Magazins *Panorama*. Der Journalist, der zugleich Jurist ist, unternahm vor etwas mehr als zehn Jahren eine Reise zu Richtern und Staatsanwältinnen, islamischen Organisationen, Sozialarbeiterinnen und sogenannten Friedensrichtern. Seine These macht wenig Mut: In Deutschland hätten sich Milieus etabliert, die nach ausschließlich eigenen Gesetzen lebten. Vor allem vor einer islamischen Paralleljustiz habe die deutsche Justiz im Grunde kapituliert. Als Weckruf erzielte das Werk volle Wirkung: Von

Berlin bis Baden-Württemberg ließen Landesregierungen Studien erstellen, die Deutsche Richterakademie und das Land Bremen setzten eine Fortbildung auf mit dem Titel „Recht ohne Gesetz, Justiz ohne Richter – Die Welt der ‚Schattenjustiz‘“. Auch Deutschlands größtes Bundesland, Nordrhein-Westfalen, machte sich auf den Weg. Mathias Rohe, Professor an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und ein Pionier in Fragen der Übersetzung islamischen Rechts in die Gegenwart der Bundesrepublik, wurde 2019 mit einem Gutachten zum Familienrecht beauftragt. Und auch das Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung wurde um eine Studie zu strafrechtlich relevanten Bereichen gebeten. Diese übernahm Hatem Elliesie zusammen mit Clara Rigoni, Senior Researcher am Max-Planck-Institut zur Erforschung von Kriminalität, Sicherheit und Recht in Freiburg. Seit mehr als zehn Jahren untersucht Rigoni, welches Verhältnis Einwanderungsgemeinschaften zu staatlichen Behörden in europäischen Ländern haben.

Gemeinsam gingen Rigoni und Elliesie der Frage nach, was Mitarbeitende in Justiz und Ermittlungsbehörden über das Phänomen „Paralleljustiz“ wissen, wie sie es einschätzen und wie sie damit umgehen.

Nun ist das ja so eine Sache, wenn eine Regierung Forschung beauftragt; wie frei ist diese dann? „Wir bekamen Kontakte und Zugang zu Vernehmungprotokollen und Prozessakten. Auf die Ergebnisse hatte das Land keinen Einfluss“, erklärt Hatem Elliesie. In Kooperation mit dem Justiz- und unterstützt vom Innenministerium – so die offizielle Formulierung – führten die Max-Planck-Forschernden vierzig Interviews mit Richtern, Staatsanwältinnen und Ermittlern, sichteteten mehr als sechzig schriftliche Antwortbögen sowie zahlreiche Gerichtsakten. Eine zentrale Frage dabei: Gibt es Hinweise auf Opfer oder gibt es Zeugen, die von Anfang an nicht aussagen wollten – oder plötzlich im Prozess nicht mehr? „Das ist in der Regel ein Indiz für eine Beilegung außerhalb der deutschen Justiz“, erklärt Clara Rigoni. Die Folgefragen lauteten dann in etwa: Welche Gründe haben eine Rolle gespielt? War die Familie beteiligt? Geht es um organisierte Kriminalität? War Geld im Spiel? Erpressung, Bedrohung, Bestechung?

## Auch Banditos und Reichsbürger

Die Gespräche förderten einiges Überraschende zutage: Nur wenige Mitarbeitende in Justiz und Ermittlungsbehörden konnten von beruflichen Erfahrungen in diesem Bereich berichten. „Wir haben viel mehr Menschen angeschrieben, als uns Auskunft geben konnten“, erzählt Rigoni. Selbst wenn man annehme, dass so manche außergerichtliche Beilegung an Staatsanwälten und Richterinnen vorbeigeht, lasse sich eine flächendeckende Verbreitung nicht erkennen. Und: Kamen Fälle zur Sprache, dann spielten diese auch in ganz anderen Gruppen als den von Joachim Wagner

beschrieben – im Rockermilieu, bei den Hells Angels oder Banditos zum Beispiel oder unter selbst ernannten Reichsbürgern.

## Viel Geld im Spiel, Druck oder Gewalt

Wo die Forschungsgruppe auf Hinweise und Erzählungen zu außergerichtlicher Konfliktbeilegung traf, identifizierte sie als verbindendes Moment „stark ausgeprägte Solidaritäts- und Loyalitätsverpflichtungen“ in drei Zusammenhängen: erstens in Gruppen, die miteinander verwandt sind und zum Teil weitreichende Großfamilien bilden; zweitens in Gruppen, deren Mitglieder sich durch eine nationale Identität eng verbunden fühlen – dazu gehören neben manchen Einwanderungsgemeinschaften zum Beispiel

auch die Reichsbürger; drittens unter Menschen, welche gemeinsame Interessen verfolgen – wie etwa die Rockergruppen.

Und der Islam? „Im Strafrecht spielt die Religion so gut wie keine Rolle“, konstatiert Clara Rigoni, „wir haben von keiner Gruppe gehört, die nur deshalb existiert, weil alle Muslime sind.“ Selbst in Fällen, in denen sogenannte Friedensrichter eingeschaltet wurden, die oft dem Islam zugeordnet werden, agierten diese meist nach traditionellen Vorstellungen des jeweiligen Herkunftslandes. Auch gebe es Friedensrichter, die für ihre Tätigkeit entlohnt werden. Richtig sei allerdings auch, dass es beim „Schlichten“, das so friedlich klingt, nicht immer um die bestmögliche Lösung für alle Beteiligten gehe: „Es kann viel Geld im Spiel sein, psychischer Druck, physische Gewalt, Bedrohung,“ so Rigoni.

Im Familienrecht attestiert Mathias Rohe der muslimischen Bevölkerung hingegen zwar Milieus, die vor allem „im Bereich von Eheschließung und -scheidung religiösen Vorstellungen folgen“. Bei näherem Besehen stehe allerdings auch hier nicht die Religion im Vordergrund, sondern „soziokulturell verankerte Mechanismen“, heißt es in seinem Gutachten. Was bedeutet das? „Die Rechtsvorstellungen ruhen auf drei Säulen“ erläutert Elliesie: „auf dem islamischen Recht – oder dem was die Menschen dafür halten –, dem Gewohnheitsrecht und dem staatlichen deutschen Recht.“ In dieser Gemengelage lasse sich regelmäßig Folgendes beobachten: „Wenn es zu einem Konflikt kommt zwischen dem, was der Imam empfiehlt, und der Vorstellung der Familienoberhäupter, überwiegt in aller Regel die tradierte Rechtsvorstellung“, berichtet er. Das Fazit: Nicht das klassische

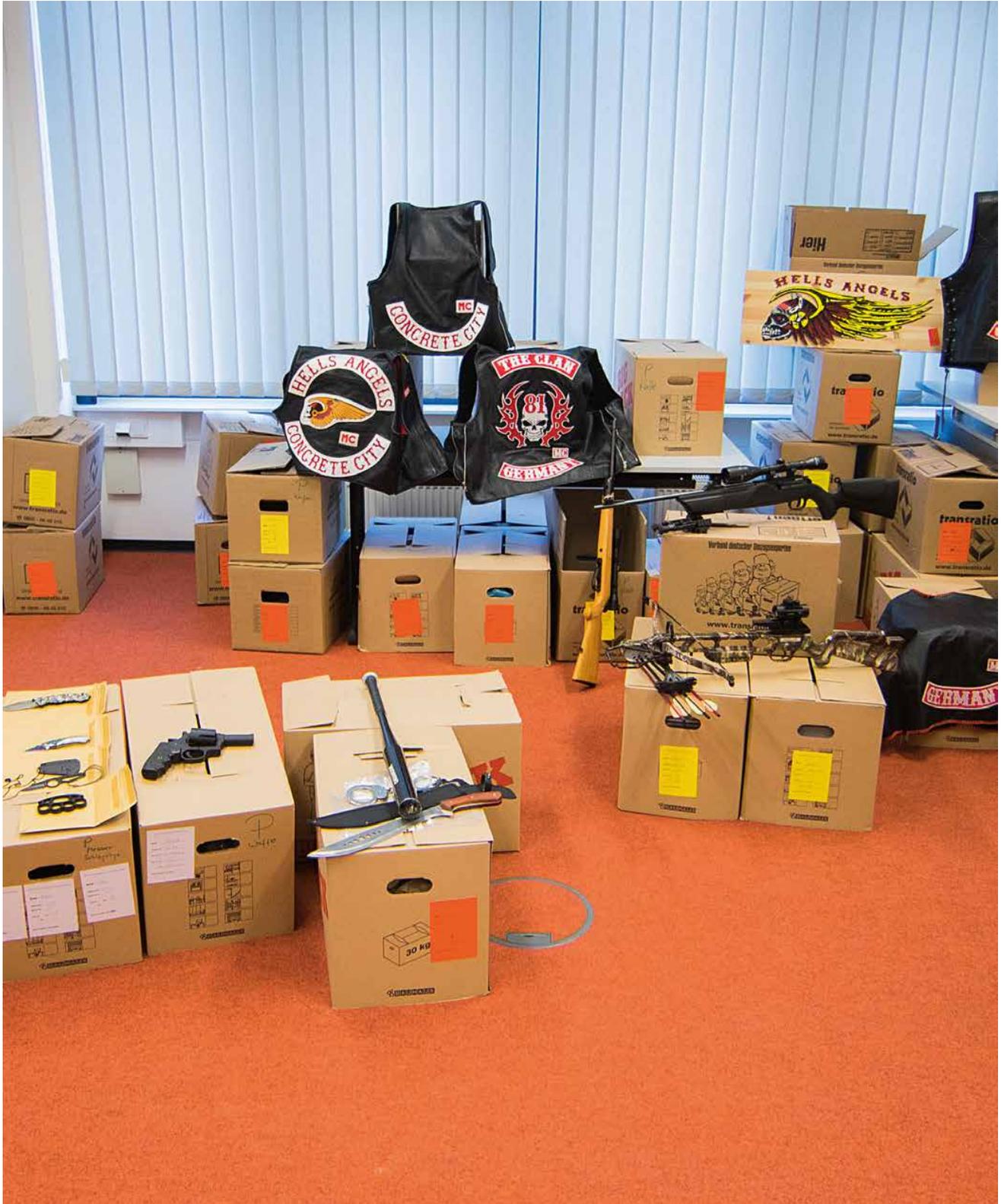


Der Jurist, Islam- und Afrikawissenschaftler Hatem Elliesie leitet am Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung eine Gruppe, die sich mit Konfliktregulierung in Deutschlands pluraler Gesellschaft befasst.



FOTO: MPI FÜR ETHNOLOGISCHE FORSCHUNG, CARLO DIESTERBECK

Außerhalb des Gesetzes: Immer wieder geraten Teilorganisationen des Motorrad- und Rockerclubs Hells Angels ins Visier der Ermittler. Die Vorwürfe reichen von Waffenbesitz, Schutzgelderpressung und Drogenhandel bis hin zu Mord. Bei einer Großrazzia stellte das Landeskriminalamt Nordrhein-Westfalen im Jahr 2017 unter anderem Kutten und Waffen einer Gruppe namens Clan 81 Germany sicher.



Verständnis der Scharia ist das Mittel zur Konfliktregulierung – sondern tradierte Werte, so wie sie in den Communities verstanden werden.

## Kein Recht auf legale Arbeit

Zu der Frage, nach welchen Werten und Normen Menschen in Deutschlands pluraler Gesellschaft leben, forschen noch bis Jahresende zwei Doktoranden und drei Postdocs innerhalb von fünf Gemeinschaften: unter Menschen syrischer, tschetschenischer, jesischer und afghanischer Herkunft sowie in Gruppen, die den sogenannten Mhallamiya zugeordnet werden, der Öffentlichkeit besser bekannt als libanesische Kurden. Zu ihnen gehören jene Großfamilienverbände, die vor allem im Bereich der organisierten Kriminalität als „Clans“ bezeichnet werden. Wenn Elliesie über sie spricht, erhellt das den Hintergrund eines Lebens, das jedenfalls zum Teil in selbst geschaffenen Strukturen stattfindet: „Die Arabisch sprechenden Mhallamiya stammen aus der Region Mardin im Süden der Türkei“, erklärt er. „Im 20. Jahrhundert wanderten viele in den Libanon aus. Als Bürger wurden sie dort nicht akzeptiert, auch Zugang zu Bildung gab es nicht.“ In Deutschland, wohin viele in den 1970er-Jahren vor dem libanesischen Bürgerkrieg flohen, wiederholte sich die Geschichte in mancher Hinsicht: „Auch hier blieben sie marginalisiert – über Jahrzehnte aufenthaltsrechtlich geduldet, ohne das Recht, einer legalen Arbeit nachzugehen.“

Und wie werden die jungen Forscherinnen und Forscher in den Communities, die nicht immer die beste Beziehung zu deutschen Behörden haben, aufgenommen? „Erstaunlich gut“, sagt Hatem Elliesie. „Wenn Anonymität und Datenschutz gewährt werden, ist die Bereitschaft hoch, die eigene Sicht zu schildern.“ Das allerdings dürfte viel mit der Auswahl der Forschenden zu tun haben: Alle fünf, die für ein Jahr im Umfeld der Beforschten leben, sprechen wegen ihrer

eigenen Herkunft sowohl Deutsch als auch die jeweiligen weiteren Sprachen. Sie kennen die sozialen und kulturellen Codes – sie können also auf Augenhöhe kommunizieren und zugleich auch Nonverbales interpretieren. Insofern erzählt das Forschungsprojekt auch eine Geschichte über eine zunehmende – und notwendige – Diversität in der Wissenschaft. Trotz der oft patriarchalen Strukturen, in denen die Forschenden unterwegs sind, spielt das Geschlecht offenbar keine Rolle: Eine der Wissenschaftlerinnen durfte sogar als ZuhörerIn jeweils bei den Treffen eines Ältestenrats dabei sein, berichtet Elliesie: „Regelmäßig findet dort eine Sitzung statt, die im Grunde ein deutsches Gericht simuliert. Anhand von Akten entscheidet der Ältestenrat über Fälle in der Gemeinde.“ Mit Wertungen halten sich die Forschenden zurück. „Wir wissen noch kaum etwas darüber, wie Menschen in diesem Land ihr Leben regulieren. Bereits die Lage zu beschreiben, ist eine enorme Aufgabe“, erklärt Hatem Elliesie. Ab Jahresende sollen die Erkenntnisse in ein gemeinsames Buch einfließen.

## Es braucht kulturelle Kompetenz

Die erwähnte Studie – *Paralleljustiz in Nordrhein-Westfalen aus strafrechtlicher Sicht* – von Hatem Elliesie und Clara Rigoni wurde bereits im März in Düsseldorf vorgestellt. Sie endet mit einer Reihe von Handlungsempfehlungen, welche in zwei Richtungen zielen. „Einerseits sollen die Vorschläge Justiz und Polizei die Arbeit erleichtern – andererseits dabei helfen, dass Menschen freien Zugang zu den staatlichen Behörden erhalten, wo dieser fehlt“, fasst Clara Rigoni zusammen. Die Forschenden raten zu einer frühen Beweissicherung, etwa durch polizeiliche Videovernehmungen, die vor Gericht eingesetzt werden dürfen, aber auch zu Zeugen-, Aussteiger- und Opferschutzprogrammen. Diese müssten allerdings zu den Menschen wie zu den Fällen passen, erklärt Clara Rigoni: „Geht es

um Konflikte in der Familie, dann braucht es einen ganz anderen Zugang als in der organisierten Kriminalität außerhalb verwandtschaftlicher Verhältnisse.“ Auch mehr Fortbildungsangebote für Justiz und Polizei seien gefragt, gleichzeitig sollten auch die jeweiligen Gemeinschaften besser mit dem deutschen Recht vertraut gemacht werden..

Bricht man die Empfehlungen auf eine kurze Formel runter, dann lautet diese etwa so: In einer Gesellschaft, in der Menschen mit vielen Geschichten miteinander leben, braucht es die Bereitschaft, einander nicht nur kennen-, sondern auch verstehen zu lernen. „Ohne kulturelle Kompetenz geht es nicht“, erklärt Clara Rigoni. Hatem Elliesie fasst es ganz kurz: „Kommunikation ist alles.“

←

67

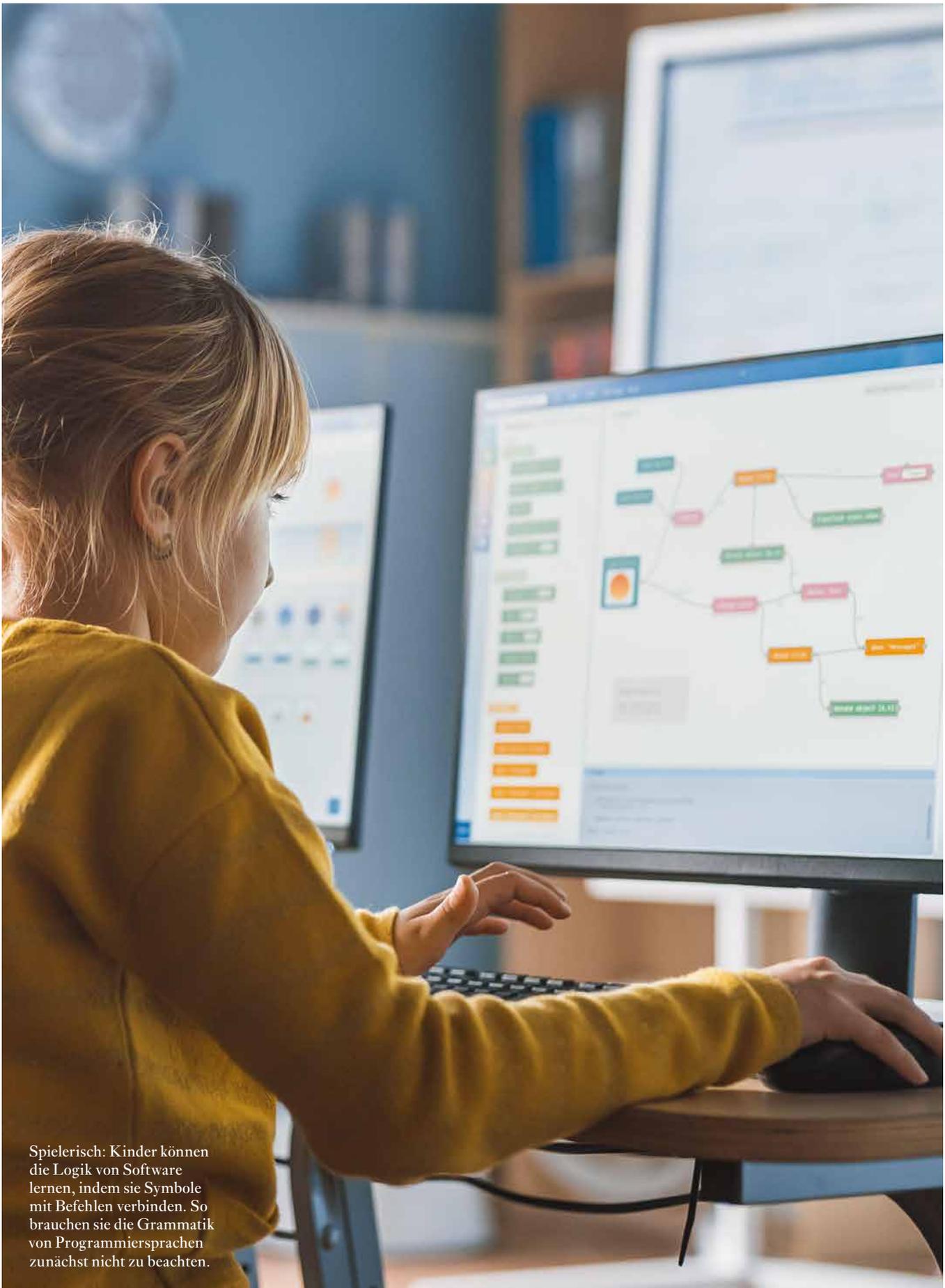
## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Eine „islamische Paralleljustiz“, wie oft in den Medien beschrieben, gibt es nicht in institutionalisierter Form.

Außergerichtliche Konfliktbeilegung findet sich in einzelnen Großfamilienverbänden sowie in bestimmten Gruppen, die durch nationale Identität oder gemeinsame Interessen verbunden sind.

Tradierte Regeln bestimmen die Rechtsvorstellungen; Konflikte werden teilweise mittels Gewalt, psychischem Druck oder Geld beigelegt.

Die Forschenden empfehlen mehr rechtskundliche Aufklärungsarbeit bei Zugewanderten, zudem Zeugen- und Opferschutzprogramme sowie bessere Fortbildungsangebote für Polizei und Justiz.



68

Spielerisch: Kinder können die Logik von Software lernen, indem sie Symbole mit Befehlen verbinden. So brauchen sie die Grammatik von Programmiersprachen zunächst nicht zu beachten.

FOTO: ALEKSEI GORODENKOV / ALAMY STOCK FOTO

# MASCHINELLES LEHREN

TEXT: THOMAS BRANDSTETTER

Künstliche Intelligenz kann Menschen in immer mehr Bereichen unterstützen – auch in der Bildung. Forschende um Adish Singla arbeiten am Max-Planck-Institut für Softwaresysteme an Methoden, die Kindern helfen sollen, das Programmieren zu erlernen. Die Algorithmen könnten aber auch in anderen Fächern zum Einsatz kommen.

Lernende Maschinen sind im Begriff, die Gesellschaft umzukrempeln. Sie überflügeln uns nicht nur in Schach und Go, sondern sie übersetzen auch Texte, können beim Erstellen medizinischer Diagnosen helfen und unsere Autos steuern. Anstatt wie frühere Computerprogramme Schritt für Schritt die Befehle ihrer menschlichen Schöpfer auszuführen, erlernen diese künstlichen Intelligenzen ihre Fähigkeiten, indem sie selbstständig riesige Datenmengen analysieren. Diesem Konzept folgend sollen sie jetzt den Schritt vom maschinellen Lernen hin zum maschinellen Lehren machen und als intelligente Werkzeuge auch im Schulunterricht zur Anwendung kommen. Daher könnten Schülerinnen und Schüler schon bald von Maschinen lernen, wie man Maschinen programmiert.

Einsteiger lernen das Programmieren gewöhnlich auf spielerische Weise mit einfachen Bildelementen. Im Rahmen von Initiativen wie etwa Hour of Code haben bereits Millionen von Kindern auf diese Weise ihre ersten Programme geschrieben. Forschende des Max-Planck-Instituts für Softwaresysteme gehen nun einen Schritt weiter. „Wir wollen die Lernerfahrungen der Kinder mit einer Software verbessern, die Lernenden mithilfe künstlicher Intelligenz auf die Sprünge hilft, wenn sie nicht mehr weiterwissen“, sagt Adish Singla, der die Gruppe „Machine Teaching“ leitet.

Solche Software könnte den Schulunterricht ziemlich verändern: „Im Klassenzimmer der Zukunft werden menschliche und digitale Lehrkraft Hand in Hand arbeiten“, sagt Maria Wirzberger, Professorin für Lehren und Lernen mit intelligenten Systemen an der Universität Stuttgart. Dabei können digitale Systeme das normale Unterrichtsgeschehen immer nur ergänzen, sie sollen die menschlichen Lehrkräfte keineswegs an die Seite drängen. Schließlich sind nur Menschen fähig, wirklich in Kontakt mit den Schülerinnen und Schülern zu treten und intuitiv auf diese zu reagieren – eine Software ist dazu nicht in der Lage. „Eine förderlich gestaltete Software kann allerdings die Zeiten

überbrücken, in denen die Lehrkraft nicht präsent sein kann“, sagt Wirzberger. So kann der digitale Assistent etwa in Selbstlernphasen einspringen und passgenaue Aufgaben an die Lernenden verteilen. Eine einzelne Lehrkraft wird es kaum schaffen, für zwanzig Schüler zwanzig unterschiedliche Arbeitsblätter vorzubereiten. „Basierend auf Fähigkeitsprofilen der Kinder kann ein KI-gestütztes System dies sehr wohl“, erklärt Wirzberger. Doch der Mensch sollte dabei die Leitung behalten und eingreifen, wenn besondere Probleme auftauchen. Unterm Strich bleiben so mehr Ressourcen für Einzelförderung – sowohl für die schwächeren Schülerinnen und Schüler als auch für die besonders starken, denen die Software Extraaufgaben stellen kann.

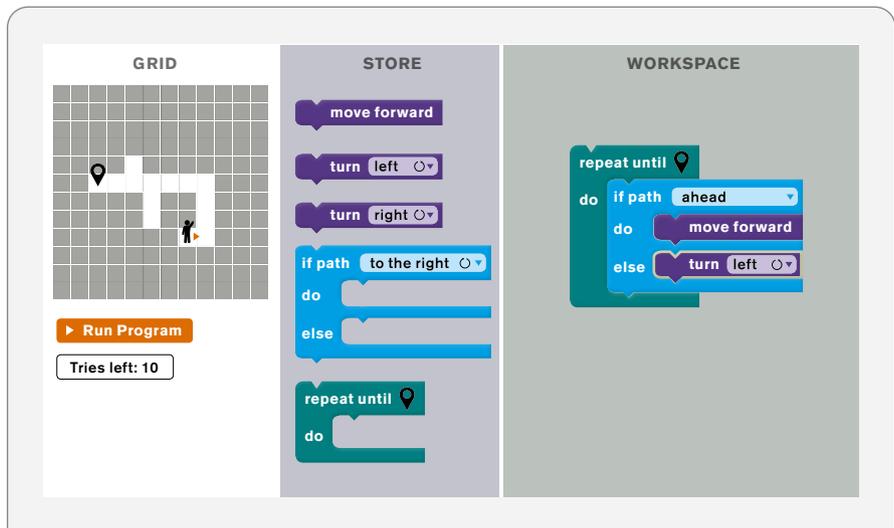
Eine ähnliche Haltung vertritt auch der Präsident des Deutschen Lehrerverbandes, Heinz-Peter Meidinger. „Auf die Lehrkraft kommt es an“, betont er. Von ihr gehe die stärkste Motivation für die Schülerinnen und Schüler aus. Zugleich sei es in einer Gesellschaft, die immer stärker von Digitalisierung und KI geprägt ist beziehungsweise sein wird, von enormer Bedeutung, dass diese Themen auch in der Schule Eingang finden. „Und zwar sowohl im Sinne eines Unterrichtsgegenstandes, indem man sich mit den Aus-

69



wirkungen beschäftigt, aber auch als Unterrichtsmedium“, sagt Meidinger. Als die große Heilsbringerin, die alle aktuellen Probleme des Schulsystems wie Lehrkräftemangel, Bildungsgerechtigkeit, Inklusion und Integration lösen wird, sieht er die künstliche Intelligenz trotzdem nicht. „Meiner Erfahrung nach führt das Überfrachten solch neuer Entwicklungen mit zu hohen Erwartungen letztlich immer zu Enttäuschung.“

Potenzial für KI im Unterricht sieht auch Meidinger vor allem in ihrer Fähigkeit, den Schwierigkeitsgrad der Aufgaben an die Bedürfnisse der Lernenden anzupassen. Man müsse sich jedoch auch darüber im Klaren sein, dass die Schülerinnen und Schüler dadurch zu unterschiedlichen Niveaus gelangen. „Ich habe zwar sehr große Sympathie für eine individuelle Begabungsförderung, und KI könnte eine Chance sein, besonders begabte Schüler tiefer in Fachgebiete hineinzu führen, als das bisher möglich ist“, sagt Meidinger. „Umgekehrt wird es



Blockweise programmieren: Um eine Figur über den weißen Weg zu einem Ziel zu führen, müssen Schülerinnen und Schüler in dieser Aufgabe der Initiative Hour of Code Befehle richtig verknüpfen. Wenn sie dabei Schwierigkeiten haben, gibt ihnen ein Programm des Max-Planck-Instituts für Softwaresysteme Tipps und stellt weitere Aufgaben, die auf ihre Verständnisprobleme zugeschnitten sind.

aber auch diejenigen geben, die trotz künstlicher Intelligenz deutlich weniger weit kommen.“ Schließlich führt individuelles Fördern auch immer zu einer größeren Leistungspreizung. „Letztlich haben wir immer noch ein Schulsystem, das mit Noten, Qualifikationen und Abschlusszeugnissen arbeitet“, gibt Meidinger zu bedenken. „Da muss das dann auch entsprechend eingepasst werden.“

## KI hält ein virtuelles Tutorium

Das Programmieren eignet sich besonders gut für den Einsatz von KI im Unterricht: Eine typische Übungsaufgabe für junge Einsteiger besteht darin, eine Figur auf dem Bildschirm auf einem bestimmten Weg zu einem Ziel zu lotsen. Dafür braucht es genaue Anweisungen, wie weit sich die Figur auf dem zugrunde liegenden Schachbrettmuster etwa geradeaus bewegen und welche Richtung sie dann einschlagen soll. Um Kinder an solche Problemstellungen heranzuführen, greifen Pädagogen vorzugsweise auf blockbasierte, visuelle Programmierertechniken zurück. Dadurch erspart man den Anfängern Ärger und den Frust, den schwer verständ-

lich geschriebene Befehle und Feinheiten in der Syntax – wie etwa der Unterschied zwischen eckigen und geschwungenen Klammern – bereiten können. Stattdessen reihen die Kinder vorgefertigte Blöcke mit kurzen Anweisungen und Bildern aneinander und können so der Figur die gewünschten Befehle intuitiv erteilen. Ein typisches Beispiel wäre etwa die Anweisung, immer wieder einen Schritt nach vorne zu gehen, solange im dortigen Feld auch die Straße weiterverläuft. Biegt die Straße schließlich nach links oder rechts ab, dann wird ein anderer Befehl fällig. So können die Kinder ihren Fokus voll auf die dem Problem zugrunde liegende Logik lenken und spielerisch einen Zugang zu computerbasiertem Denken entwickeln.

In der Forschungsgruppe „Machine Teaching“ des Max-Planck-Instituts für Softwaresysteme in Saarbrücken arbeiten Adish Singla und sein Team daran, solche Übungsaufgaben mit künstlicher Intelligenz weiterzuentwickeln. Bereits 2020 haben die Forschenden einen Algorithmus vorgestellt, der mit Methoden des maschinellen Lernens automatisch Übungsaufgaben erzeugt. „Wenn ein Schüler ein Problem gelöst und die Figur ans Ziel gebracht hat, stellen wir ihm eine

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Algorithmen können im Programmierunterricht auf Lernende individuell zugeschnittene Aufgaben erstellen und bei deren Lösung helfen. Dabei sollen Unteraufgaben gezielt das Verständnis für die Schritte verbessern, bei denen die Schülerinnen und Schüler Probleme haben.

Der Ansatz lässt sich auf andere Fächer wie Mathematik übertragen, in denen ergebnisoffene konzeptionelle Probleme gelöst werden müssen.

Die Software kann Lehrkräfte unterstützen, aber nicht ersetzen. Lehrerinnen und Lehrer bleiben die wichtigsten Motivatoren und müssen in besonders schwierigen Fällen eingreifen. Methoden der maschinellen Lehre lassen ihnen jedoch mehr Zeit für die Einzelförderung.

weitere, ähnliche Aufgabe, anhand derer er das Erlernete dann vertiefen kann“, sagt Adish Singla.

Inzwischen arbeitet Singlas Forschungsgruppe an einem KI-gestützten, virtuellen Tutoriumsystem, welches den Kindern auch direkt beim Lösen einer bestimmten Aufgabe helfen soll. Kommt eine Schülerin oder ein Schüler bei einer Aufgabe allein nicht mehr weiter, erkennt das System, dass es Schwierigkeiten gibt, und versucht, mit Hinweisen zu helfen. In einer früheren Version bessert die Software Fehler einfach aus, präsentiert also unmittelbar die richtige Lösung, damit die Schülerin von diesem Punkt aus wieder weiterarbeiten kann. Das ist gegebenenfalls bereits eine große Hilfe – doch es geht noch besser.

„Was wir heute machen, ist viel weiter fortgeschritten“, sagt Singla. „Jetzt hilft die Software den Kindern mit personalisierten Ratespielen, wenn sie nicht mehr weiterwissen.“ Der Algorithmus entwickelt also eine eigene kleine Unteraufgabe und bietet mehrere Lösungsvorschläge dazu an, um den Lernenden auf die Sprünge zu helfen. Indem die künstliche Intelligenz gewissermaßen sagt: „Denk doch noch einmal über diesen Teil hier nach!“, wird das Kind selbst zum Handeln aufgefordert und behält die Kontrolle. „Das ist wesentlich motivierender als das einfache Ausbessern eines Fehlers“, erklärt Adish Singla. Die Herausforderung für die Software besteht allerdings darin, die einfachste Aufgabe zu finden, anhand derer das Kind das Konzept verstehen kann, das ihm gerade Schwierigkeiten bereitet.

## Alle können die Software evaluieren

„Es ist nicht leicht, automatisch ein geeignetes Ratespiel zu kreieren“, sagt Singla. Das sei schließlich immer eine eigene kleine Programmieraufgabe. Um eine solche Unteraufgabe zu entwickeln, gibt es theoretisch zwar eine Vielzahl an Möglichkeiten, aber nur wenige davon haben auch sinnvolle, interessante Lösungen, anhand derer

sich das unklare Programmierkonzept verdeutlichen lässt. „Ein zentraler Punkt unserer aktuellen Arbeit besteht darin, automatisch herauszufinden, welche falsche Annahme einem Fehler zugrunde liegt“, sagt Singla. Denn nur so kann die Software den Lernenden helfen, die falsche Annahme selbst zu korrigieren. Singla und sein Team konzentrieren sich in ihrer Arbeit auf die grundlegende Funktionalität der Software. Indem sie KI einbinden, wollen sie es den Schülerinnen und Schülern ermöglichen, auch dann damit zu arbeiten, wenn gerade niemand da ist, der ihnen helfen kann.

Zwar beschränken sie sich in ihrer aktuellen Arbeit auf den Programmierunterricht. Die Methoden, welche die Forschenden dabei entwickeln, können aber breitere Anwendung finden, etwa in der Mathematik. „Im Wesentlichen möchten wir KI entwickeln, die den Schülerinnen und Schülern helfen kann, ergebnisoffene konzeptionelle Probleme zu lösen“, sagt Singla. Schließlich sei es sowohl für die Lernenden als auch für die künstliche Intelligenz besonders herausfordernd, wenn es für eine Aufgabe keinen vorbestimmten Lösungsweg gibt. „Wichtig ist auch, dass eine Software die Lernenden motiviert und bei der

Stange hält“, sagt Maria Wirzberger. Dabei können kleine, menschenähnliche Figuren helfen, die Hinweise geben oder wichtiges Feedback liefern. „Auch spielerische Elemente können motivierend wirken, etwa wenn mathematische Rätsel gelöst werden müssen, um einen Schatz zu finden“, sagt Wirzberger. Nur wenn alle diese Aspekte zusammenkommen, kann eine Lernsoftware erfolgreich sein.

Der Deutsche Lehrerverband wiederum wünscht sich, dass der Einsatz KI-gestützter Lernsoftware in Deutschland Hand in Hand geht mit empirischer Forschung, etwa indem die neuen Methoden an Modellschulen evaluiert werden. „Im Endeffekt zählt nur, was Bildung und Lernerfolg der Kinder besser macht“, sagt Präsident Heinz-Peter Meidinger. Und wenn es gut funktioniert, solle man die neue Technik dann natürlich auch flächendeckend einsetzen. Solch eine Vorgehensweise ist ganz im Sinn der Forschenden. Deshalb stellt das Team von Adish Singla die Software schon online zur Verfügung, damit alle sie ausprobieren und zu ihrer Evaluierung beitragen können. Auf diese Weise werden die maschinellen Assistenten Schritt für Schritt auf ihren Einsatz im Unterricht vorbereitet.

[www.teaching-blocks-hints.cc](http://www.teaching-blocks-hints.cc)

71

Georgios Tzannetos, Adish Singla und Ahana Ghosh (von links) diskutieren, wie sie die Software, die Schülerinnen und Schüler mithilfe künstlicher Intelligenz unterstützt, weiterentwickeln können.



FOTO: MATS KARLSSON FÜR MPG



FOTO: ADOBE STOCK/BARTEK WRÓBLEWSKI

**Cooler Computer:** Das finnisch-deutsche Unternehmen IQM entwickelt Quantenrechner, die mit supraleitenden Schaltkreisen, sogenannten SQDS, rechnen. Diese werden mit einem solchen Kryostaten auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt von minus 273,15 Grad Celsius gekühlt.

# QUANTENRECHNER AUF DEM SPRUNG

TEXT: ROLAND WENGENMAYR

Sie sollen Probleme lösen, an denen heute sogar die besten Computer scheitern. Mit dieser Erwartung investieren Regierungen, aber auch private Geldgeber massiv in die Entwicklung von Quantencomputern. Was die Rechner in den kommenden Jahren tatsächlich leisten können, erforscht das Team von Ignacio Cirac, Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Demnach werden sich wohl nicht alle Hoffnungen so bald erfüllen.

Eigentlich sollte Ignacio Cirac Grund zu Enthusiasmus haben. Der Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München ist ein Pionier der Entwicklung von Quantencomputern. Solche Rechner sollen mithilfe der Quantenphysik manche Aufgaben etwa in der Logistik oder bei der Entwicklung neuer Medikamente und Werkstoffe wesentlich schneller bewältigen als heutige Computer. In dieser Hoffnung überbieten sich staatliche Institutionen geradezu bei der Förderung der Quantentechnologie, vor allem des Quan-

tencomputers: Die deutsche Bundesregierung hat von 2021 bis 2025 zwei Milliarden Euro für das Gebiet zur Verfügung gestellt, die US-Regierung gibt ebenfalls für vier Jahre rund eine Milliarde Dollar, und die EU-Kommission hat in einem über zehn Jahre laufenden Flaggschiffprogramm etwa genauso viel ausgelobt. Doch China übertrifft alle anderen mit gleich zehn Milliarden Euro für ein Institut für Quanteninformationswissenschaft. Dazu kommt: Neben zahlreichen Start-ups beteiligen sich auch große Unternehmen wie Google und IBM am Rennen zu den ersten Quantenrechnern – und sie begleiten jeden Fortschritt mit einigem medialen Tamtam. Hunderte Millionen Euro investieren die Firmen und ihre Kapitalgeber in die Entwicklung von Quantencomputern.

Das Forschungsfeld von Ignacio Cirac boomt also augenscheinlich. Doch das führt bei dem Physiker nicht nur

zu Begeisterung, sondern auch zu Beunruhigung. Wie viele seiner Kollegen, die sich auf dem Gebiet der Quanteninformation gut auskennen, fürchtet er, dieser Hype um Quanteninformationstechnologien könnte bei Misserfolgen bald ins Gegenteil umschlagen. „Wir werden jetzt nicht mehr nur durch die Forschung angetrieben, sondern auch durch Investoren“, sagt Cirac. Die aber könnten zu ungeduldig sein. Angesichts der enormen technischen Herausforderungen erwartet Cirac nämlich, dass es mindestens noch zehn Jahre, vielleicht sogar zwanzig bis dreißig Jahre dauern könnte, bis es wirklich anwendungsreife universelle Quantencomputer geben wird. „So lange wird aber kein Hype andauern“, betont er, „und am Ende werden wir Wissenschaftler als die Schuldigen ausgemacht, wenn der Quantencomputer noch nicht so weit ist.“ Die große Zukunftsvision sind universelle, das heißt frei programmierbare Quantencomputer. Sie sind

73

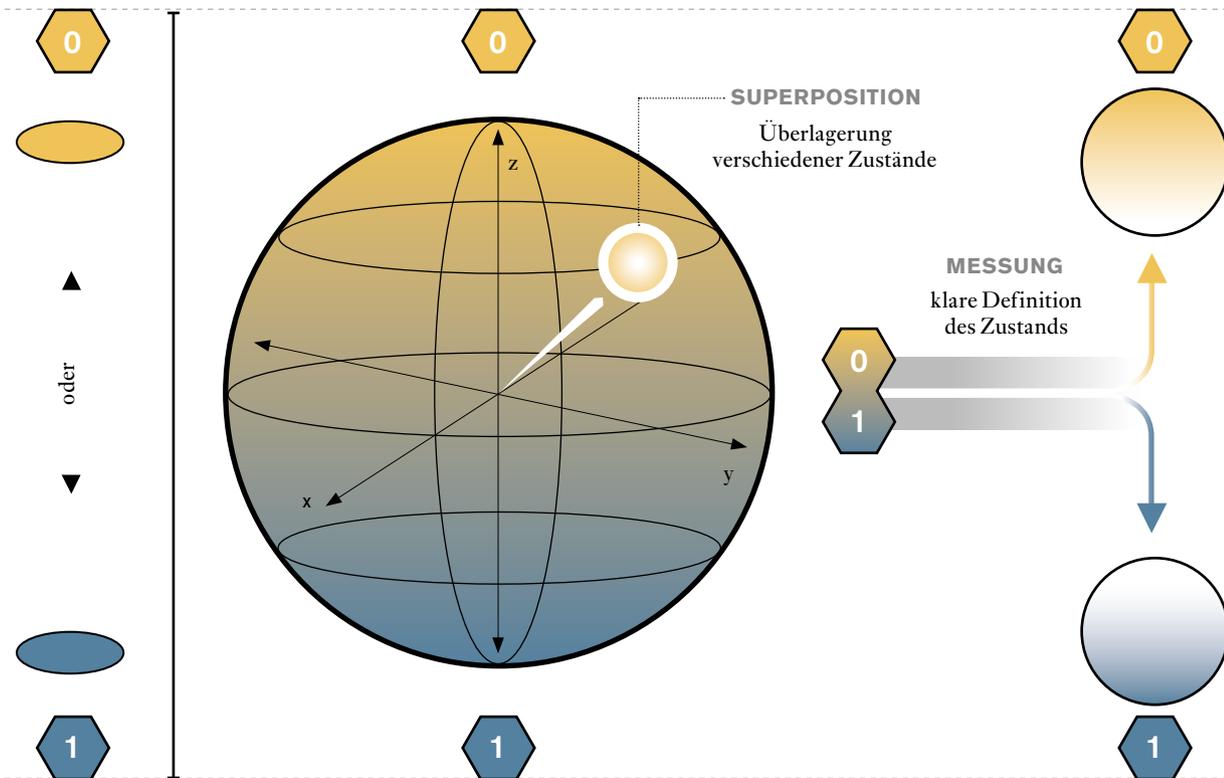
→

**KLASSISCHES BIT**

binäres System

**QUANTENBIT (QUBIT)**

willkürlich manipulierbares Quantensystem



74

GRAFIK: GCO NACH VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT 2019

Vieldeutiges Bit: Anders als ein klassisches Bit kann ein Quantenbit auch Überlagerungen der Zustände 0 und 1 annehmen, die sich mit den Koordinaten x, y und z auf einer Kugel darstellen lassen und bei einer Messung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auftreten. Da Quantencomputer so verschiedene Lösungen parallel testen können, dürften sie manche Aufgaben schneller bewältigen als klassische Rechner.

das Gegenstück zu den digitalen Computern: Analog zu den digitalen Bits rechnen sie mit Quantenbits, kurz Qubits. Ihre Rechenmacht, wenn es um bestimmte Aufgaben geht, beziehen sie aus den Regeln der Quantenwelt: Anders als ein digitales Bit kann ein Qubit nicht allein die Zustände 0 und 1 annehmen, sondern sich auch in einer Überlagerung beider Zustände befinden. Darüber hinaus können mehrere Qubits miteinander überlagert werden. Diese Verschränkung bildet das Rechenwerk eines Quantencomputers.

Ein universeller Quantencomputer könnte vielfältige Anwendungen finden. „Ein typisches Beispiel ist das Problem des Handlungsreisenden“, sagt Cirac. Der Handlungsreisende soll eine gewisse Anzahl von Städten besuchen und will dafür die kürzeste Strecke errechnen. „Wie wächst nun mit der Anzahl der Städte die dafür auf einem digitalen Computer benötigte Rechenzeit?“, fragt der Physiker und antwortet gleich selbst: „Sie wächst exponentiell!“ Das sei typisch für derartige kombinatorische Probleme, und die lauern vielfältig dar-

auf, zum Beispiel in der Technik, Rechenzeiten auf herkömmlichen Computern explodieren zu lassen. Und nicht nur das: Auch der für das Rechnen benötigte Speicherplatz kann lawinenartig anwachsen.

Die Sache mit der exponentiellen Explosion kennen wir alle seit Beginn der Coronapandemie. Die Legende von der Erfindung des Schachspiels kann sie veranschaulichen. Der von dem neuen Spiel begeisterte König will dem Erfinder eine Belohnung zukommen lassen, die dieser sich aus-

suchen darf. Der im Gegensatz zum König mathematisch versierte Erfinder überlegt und wünscht sich dann Reis, nach folgender Regel: für das erste Feld des Schachbretts ein Reiskorn, für das zweite zwei Körner und dann für jedes nächste Feld immer die doppelte Anzahl. Mathematisch ergibt dies bei 64 Spielfeldern die Zahl  $2^{64} - 1$ , die in dieser Form als Potenz harmlos aussieht, aber gigantisch groß ist. Der König müsste dem Erfinder des Schachspiels so viel Reis geben, dass die Menge umgerechnet jener von rund zweitausend heutigen Weltjahresproduktionen entspräche.

Eine solche exponentielle Explosion erschwert auch die Lösung von Aufgaben aus der Physik und Chemie, die Quantencomputer schon recht bald bearbeiten könnten. Zum Beispiel wenn es darum geht, gezielt neue medizinische Wirkstoffe oder neue Werkstoffe zu entwickeln – etwa praxistaugliche Materialien, die Strom ohne Widerstand leiten. Denn wer die Eigenschaften von chemischen Reaktionen, von Molekülen und Materialien möglichst exakt berechnen will, muss unweigerlich Quanteneigenschaften berücksichtigen, genauer gesagt: das komplexe Zusammenspiel von Elektronen. Das Verhalten eines solchen Quantenvielteilchensystems kann selbst ein heutiger Supercomputer nicht berechnen. Daher hantieren Programme etwa für die Materialentwicklung mit stark vereinfachten Näherungsmodellen. Entsprechend unterentwickelt ist deren Vorhersagekraft. Quantencomputer können im Prinzip ein viel präziseres Materialdesign ermöglichen. Die Grundidee geht auf den amerikanischen Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman zurück. Sie lautet: Will man ein Quantensystem exakt berechnen, so nehme man ein angepasstes zweites Quantensystem, welches sich als adäquates Ersatzteam eignet. Doch anders als das schwer zugängliche Untersuchungsobjekt, etwa das Elektronenkollektiv in einem Supraleiter, muss dieses zweite Quantensystem wie ein Rechenwerk gut von außen

steuerbar sein. Genau dadurch zeichnet sich ein Quantencomputer aus, und zwar in der Rolle eines Quantensimulators.

## Simulatoren für die physikalische Forschung

Vergleicht man das mit der Geschichte der klassischen Computer, dann sind Quantensimulatoren das Pendant zu Analogrechnern. Das waren hochspezialisierte Computer, die zum Beispiel die aerodynamischen Eigenschaften eines zu entwickelnden Flugzeugs simulierten. Anders als digitale Computer, welche Information portionsweise als Bits verarbeiten, bildeten Analogcomputer ein bestimmtes System kontinuierlich nach, etwa mechanisch oder elektronisch. Analogcomputer hatten ihre große Zeit, als digitale Computer noch nicht so leistungsfähig waren. Heute, in der Frühphase der Quantencomputer, ist es ähnlich. Quantensimulatoren werden bereits zunehmend interessant, um zumindest Fragen der physikalischen Grundlagenforschung anzupacken. Daran forscht zum Beispiel die Gruppe von Immanuel Bloch, ebenfalls Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik, mit der Ciracs Team auch zusammenarbeitet.

Von dem universell programmierbaren Quantencomputer trennt einen Quantensimulator, der heute oder zumindest in naher Zukunft verfügbar ist, etwa so viel wie einen alten Analogrechner vom heutigen PC. Ciracs Team verfolgt daher eine doppelte Strategie. Ein Teil der von den Garchingern entwickelten Algorithmen wird erst in fernerer Zukunft auf leistungsfähigen, fehlerkorrigierten universellen Quantencomputern laufen können. Der andere Teil soll schon möglichst bald auf den bereits verfügbaren Quantenrechnern mit relativ wenigen Qubits einsetzbar sein und besonders in der Quantensimulation erste Vorteile demonstrieren. „Wir wollen zeigen, dass man schon jetzt

auf Quantencomputern etwas Nützlich machen kann, das auf klassischen Computern nicht mehr geht“, sagt Cirac, „zum Beispiel die Eigenschaften von einigen neuen Materialien vorherzusagen.“ Dazu kooperiert er auch mit Google Research, der Forschungsabteilung von Google.

Für die Hardware von Quantencomputern sind verschiedene physikalische Systeme im Wettrennen. Immanuel Blochs Gruppe etwa setzt auf ultrakalte Atome als Qubits, die in einem räumlichen Gitter aus Laserstrahlen gefangen sind und über Laserlicht angesteuert werden. Google hingegen entwickelt Chips, die winzige supraleitende Schaltkreise als Quantenbits nutzen. Mit einem solchen Quantenprozessor namens Sycamore, der 53 funktionierende Qubits enthielt, konnte die Google-Forschung 2019 erstmals demonstrieren, dass ein Quantencomputer in der Berechnung einer Aufgabe den leistungsfähigsten konventionellen Supercomputer schlagen kann. „Allerdings war das eine rein akademische Aufgabe ohne sinnvolle Anwendung“, kommentiert Cirac diesen gefeierten Durchbruch. Und Markus Hoffmann von Google Research in München vergleicht es mit dem ersten Motorflug-Hüpfer der Gebrüder Wright: „Mit diesem Flug sind wir auf einer ersten Insel gelandet, die klassisch nicht erreichbar ist – aber diese ist noch unfruchtbar.“ Er betont auch, dass Google Research das technische Entwicklungsniveau von Quantencomputern realistisch einschätzt. Zugleich gibt er sich optimistisch. So erwartet Google, dass die nächsten Meilensteine hundert supraleitende Qubits sind, danach tausend und schließlich – etwa in einer Dekade – eine Million.

75

## Die Grenzen von Quantencomputern

Schon mit hundert Qubits ließe sich in der Materialentwicklung etwas anfangen. Will man nämlich die Eigen-



schaften eines mikroskopisch kleinen Supraleiterstückchens exakt berechnen, die von hundert stark miteinander wechselwirkenden Elektronen bestimmt werden, landet man bei einem Problem mit  $2^{100}$  Unbekannten. Das ist weit mehr, als das Universum Sterne hat, und überfordert absehbar alle herkömmlichen Großcomputer. Ein Quantencomputer würde hingegen nur hundert verschränkte Qubits benötigen, um die Aufgabe zu lösen. Aber wie macht er das?

Mari Carmen Bañuls, leitende Forscherin in Ciracs Abteilung, versucht, die Prozedur zu erklären: „Man schreibt seine Instruktionen in die Quantenbits hinein und präpariert sie so in einem bestimmten Quantenzustand.“ Die zu berechnende Aufgabe, die einen bestimmten Quantenalgorithmus nutzt, steckt dabei in der Art, wie die Quantenbits anfänglich verschränkt sind. „Dann lässt man das System sich eine gewisse Zeit entwickeln“, erklärt die Physikerin, „und macht dann eine Messung, um das Ergebnis zu bekommen.“ Das ist in gewisser Weise mit dem Kochen in einem Schnellkochtopf vergleichbar: Man gibt die Zutaten hinein, verschließt den Topf und startet den Kochvorgang. Nach einer vom Rezept festgelegten Zeit schaut man nach, ob der Eintopf gelungen ist. Während des Kochens hat man nur den Druckanzeiger als Information über die Vorgänge im Topf – aber immerhin.

In der Quantenwelt ist nicht einmal eine solche Anzeige erlaubt, solange die verschränkten Qubits vor sich hin werkeln. Denn hier kommt eine weitere Eigenheit ins Spiel: Quanteninformation ist ein extremes Sensibelchen. Selbst ein minimaler Eingriff entspricht einer Messung, welche die Verschränkung sofort kollabieren lässt. Also darf man erst nach Ablauf der im Quantenrezept festgelegten Zeit nachschauen, sprich: eine Messung machen, und bekommt dann das erwünschte Resultat – vielleicht. Denn es gibt noch eine Besonderheit der Quantenmechanik. Sie beschreibt nur Wahrscheinlichkeiten, mit denen

sich bestimmte Quantenzustände einstellen. Ein Quantencomputer würde also nicht  $1 + 1 = 2$  liefern, sondern das Resultat 2 nur mit einer gewissen, allerdings exakt berechenbaren Wahrscheinlichkeit ausgeben. Auch das ist ein Hinweis darauf, dass der Einsatz von Quantencomputern nur für spezielle Aufgaben sinnvoll sein wird, für die solch eine Unsicherheit tolerabel ist oder es keine Alternative

---

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Regierungen und Unternehmen investieren derzeit massiv in die Entwicklung eines Quantencomputers, der manche Aufgaben viel schneller lösen könnte als die besten heute verfügbaren Rechner.

Es wird vielleicht noch Jahrzehnte dauern, bis es einen universell programmierbaren Quantencomputer gibt, vor allem weil Rechnungen mit ihm sehr fehleranfällig sind und Quanteninformation sehr empfindlich ist. Forschende unter anderem des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik arbeiten deshalb an der Fehlerkorrektur und der Validierung von Quantenrechnungen.

Quantensimulatoren lassen sich heute bereits für Untersuchungen in der physikalischen Grundlagenforschung nutzen. In naher Zukunft könnten sie auch die Entwicklung neuer Werkstoffe und Medikamente erleichtern.

---

gibt. Welche Aufgaben das sein könnten, das erforscht Ciracs Team ebenfalls. Denn hier ist trotz kühner Zukunftsvisionen noch sehr vieles offen: „Wir untersuchen auch, was Quantencomputer *nicht* können“, betont Cirac. Dies soll verhindern, dass wertvolle Ressourcen auf nicht erreichbare Ziele verschwendet werden.

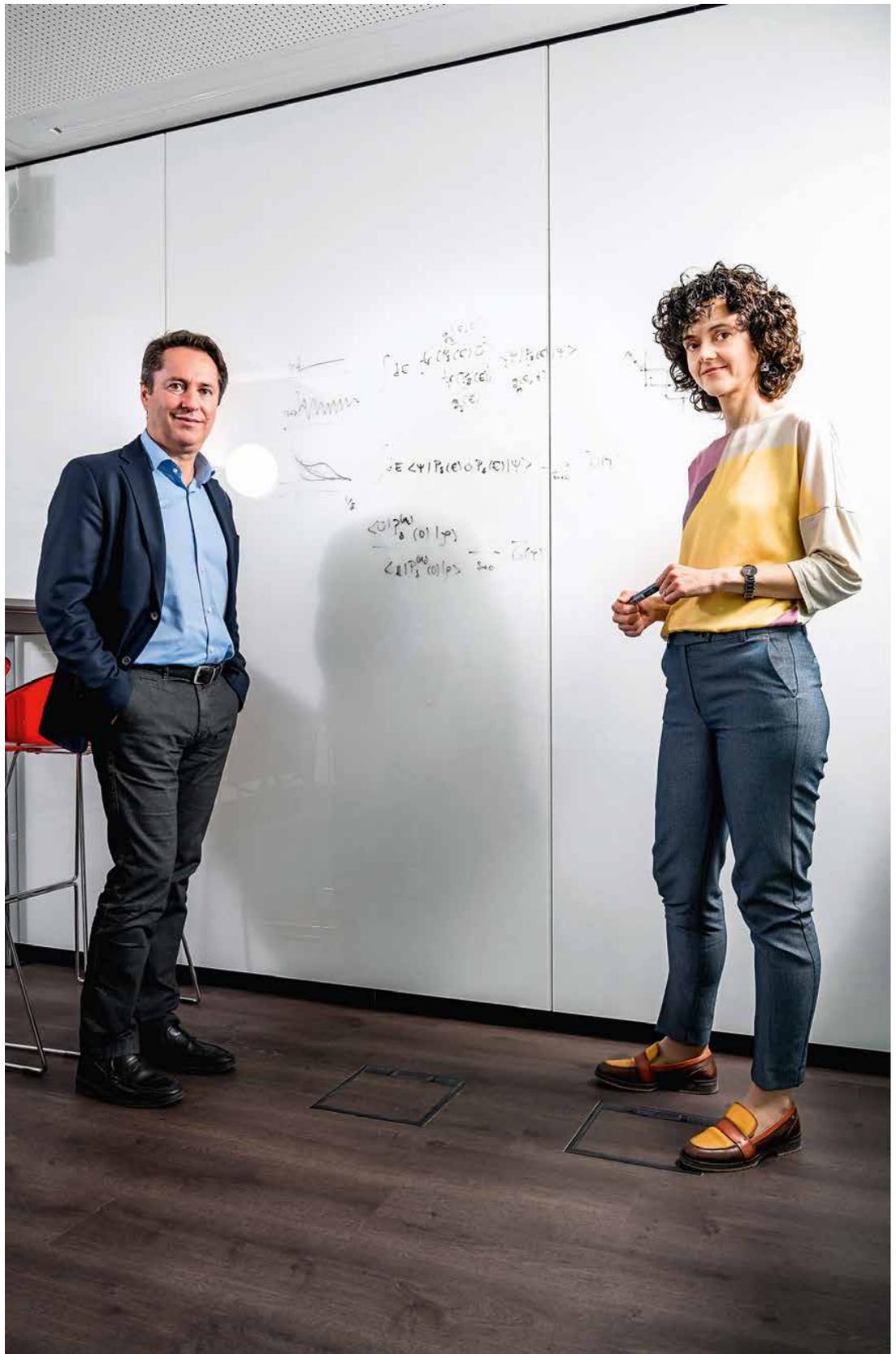
Auch ein universell programmierbarer Quantencomputer kann also nicht beliebige Probleme lösen. Und um die Hoffnungen überhaupt zu erfüllen, die auf ihn gesetzt werden, reichen selbst die von Google in rund zehn Jahren angepeilten eine Million Qubits nicht. Das liegt nicht zuletzt am Unterschied zwischen physikalischen und logischen Qubits, wie Google-Forscher Markus Hoffmann erklärt. Ein physikalisches Quantenbit ist eben zum Beispiel ein in einem Lichtgitter schwebendes Atom oder ein mikroskopischer supraleitender Kreisstrom. Doch weil diese physikalischen Bits so anfällig gegenüber Störungen aus der Umwelt sind, gibt es den Plan, mehrere physikalische Qubits zu einem logischen Qubit zusammenzuschalten, um darin die Quanteninformation wesentlich stabiler zu speichern. Bei der supraleitenden Technik, wie Google sie erforscht, würde ein logisches Qubit aus tausend synchronisierten physikalischen Qubits bestehen.

Bei einem universellen Quantencomputer werden viele zwischen den und rund um die logischen Qubits verteilte Hilfsquantenbits hinzukommen. Sie sollen als zusätzliche Sensoren Störungen messen. All das ist der Herausforderung geschuldet, dass die eigentlich rechnenden logischen Qubits während ihrer Arbeit nicht auf Fehler geprüft werden dürfen, was ein herkömmlicher Computer täte. Eine Prüfung wäre ja eine verbotene Messung. Aber auf Basis der Informationen von den Hilfsqubits und der Ergebnisse der logischen Qubits kann der Algorithmus eine sinnvolle Fehlerkorrektur machen.

Solche Konzepte für einen universellen, fehlerkorrigierten Quantencomputer haben Schätzungen zufolge einen hohen Preis. „Das läuft auf vielleicht hundert Millionen physikalische Qubits hinaus“, sagt Cirac: „Ein solcher Quantencomputer würde mit seinen Vakuum- und Kühlvorrichtungen unser ganzes Institut füllen!“ Mit der heutigen Technik sind diese Anforderungen also „crazy“, wie

→

FOTO: BETHEL FATH FÜR MPG



Forschen mit kurz- und mit langfristiger Perspektive: Ignacio Cirac und Mari Carmen Bañuls untersuchen, wie Quantenrechner bereits mit relativ wenigen Qubits nützliche Erkenntnisse liefern können. Darüber hinaus entwickeln sie Algorithmen für universell programmierbare Systeme mit etwa einer Million Qubits.

Cirac betont, und genau deshalb macht ihm der gegenwärtige Hype Sorgen. Aus seiner Sicht sind auch noch grundlegende technische Herausforderungen nicht gemeistert.

## Neue Ideen aus ersten Anwendungen

Erstaunlich gelassen ist hingegen Thomas Monz von der Universität Innsbruck. Er gehört zu einem Team um Rainer Blatt, das eine andere Technik vorantreibt. Die Forschenden nutzen elektrisch geladene Calciumatome, die – wie Perlen aufgereiht – in einer elektromagnetischen Falle, der sogenannten Paul-Falle, schweben. Angesteuert werden sie mit Laserstrahlen. Der Vorteil dieser Calciumionen besteht darin, dass sie wegen ihrer elektrischen Abstoßung sehr stark miteinander wechselwirken. Dies lässt sich

für eine sehr kräftige Verschränkung nutzen. Bereits 24 Qubits konnten in diesem Ionen-Quantencomputer verschränkt werden.

„Das klingt nach wenig, aber diese Verschränkung ist sehr stabil“, sagt Monz. Er ist auch Geschäftsführer des Startups Alpine Quantum Technologies (AQT), das bereits Ionen-Quantencomputer kommerziell verkauft. Seine Gruppe an der Universität Innsbruck, unterstützt durch AQT, hat in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Jülich kürzlich erstmals eine erfolgreiche Quantenfehlerkorrektur demonstriert. „Dazu haben wir je sieben physikalische Qubits zu logischen Qubits zusammengeschaltet“, sagt Monz. Die Idee ist einfach: Nach einer gewissen Rechenzeit weichen gewöhnlich Zustände einiger physikalischer Qubits, die ein logisches Qubit formen, wegen Fehlern voneinander ab; dann zeigt die Mehr-

---

## GLOSSAR

**QUANTENCOMPUTER**  
rechnen mit Quantenbits, die – anders als digitale Bits – auch Überlagerungen der Zustände 0 und 1 annehmen können. Überdies können die Zustände mehrere solcher Qubits miteinander verschränkt werden. Damit können sie verschiedene Lösungen einer Rechenaufgabe parallel bearbeiten und kommen bei manchen Problemen deutlich schneller zu Lösungen als herkömmliche Rechner.

**QUANTENSIMULATOR**  
wird ein spezialisierter Quantencomputer genannt, der mit wesentlich weniger Qubits auskommt als ein frei programmierbarer Quantencomputer und spezielle Aufgaben, etwa in der Materialwissenschaft, lösen kann.

---

heit der Qubits, die im Zustand übereinstimmen, wahrscheinlich das korrekte Ergebnis an. „Bei der Quantenfehlerkorrektur geht es ja einfach um Redundanz“, sagt Monz.

Um mit der Fehleranfälligkeit von Quantenrechnungen besser umgehen zu können, haben Cirac und sein Team ein Projekt gestartet: „Wir arbeiten an der Verifikation von Rechenergebnissen“, sagt er: „Ich denke, das ist eine wichtige Fragestellung.“ Denn es soll sichergestellt sein, dass Quantencomputer verlässliche Ergebnisse produzieren. Solch ein Debugging muss auch die etablierte Computertechnik immer wieder vornehmen.

Trotz aller Einschränkungen, trotz der Hindernisse, die Quantencomputer noch nehmen müssen, ehe sie für breitere Anwendungen nutzbar sind, ist Cirac überzeugt: Gibt es sie erst einmal, werden sie zu unerwarteten Ideen führen. Der inspirierende Effekt der fortschreitenden Entwicklung motiviert ihn auch, schnell zu ersten, kleineren Anwendungen zu kommen. Er ist sicher: „Falls wir in fünfzehn Jahren wieder ein Interview führen, werden die wichtigsten Anwendungen der Quantenphysik nicht die sein, über die wir heute gesprochen haben!“

Modell eines Quantensystems:  
Gekreuzte Laserstrahlen formen ein Gitter, das einem Eierkarton ähnelt. In dessen Kuhlen lassen sich Atome fangen, die Quantenphänomene simulieren können. Solche Systeme sind aber auch Kandidaten für universelle Quantencomputer.





# ACH, MENSCH

1 2

Vergangenheit  
Zukunft

WIE LEBTEN DIE ERSTEN  
MENSCHEN IN EUROPA?

WIE COOL DURFTE MAN IN  
FRÜHEREN ZEITEN AUFTRETEN?

SEIT WANN GIBT ES  
BETRIEBSRÄTE?

WIE HAT ERDÖL DIE  
WELT VERÄNDERT?

WIE PRÄGT DER KOLONIALISMUS  
NOCH HEUTE DAS RECHT?

Geistes- und  
Sozialwissen-  
schaftler:innen  
im Gespräch

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

Ab April 2022 mit neuen Folgen!

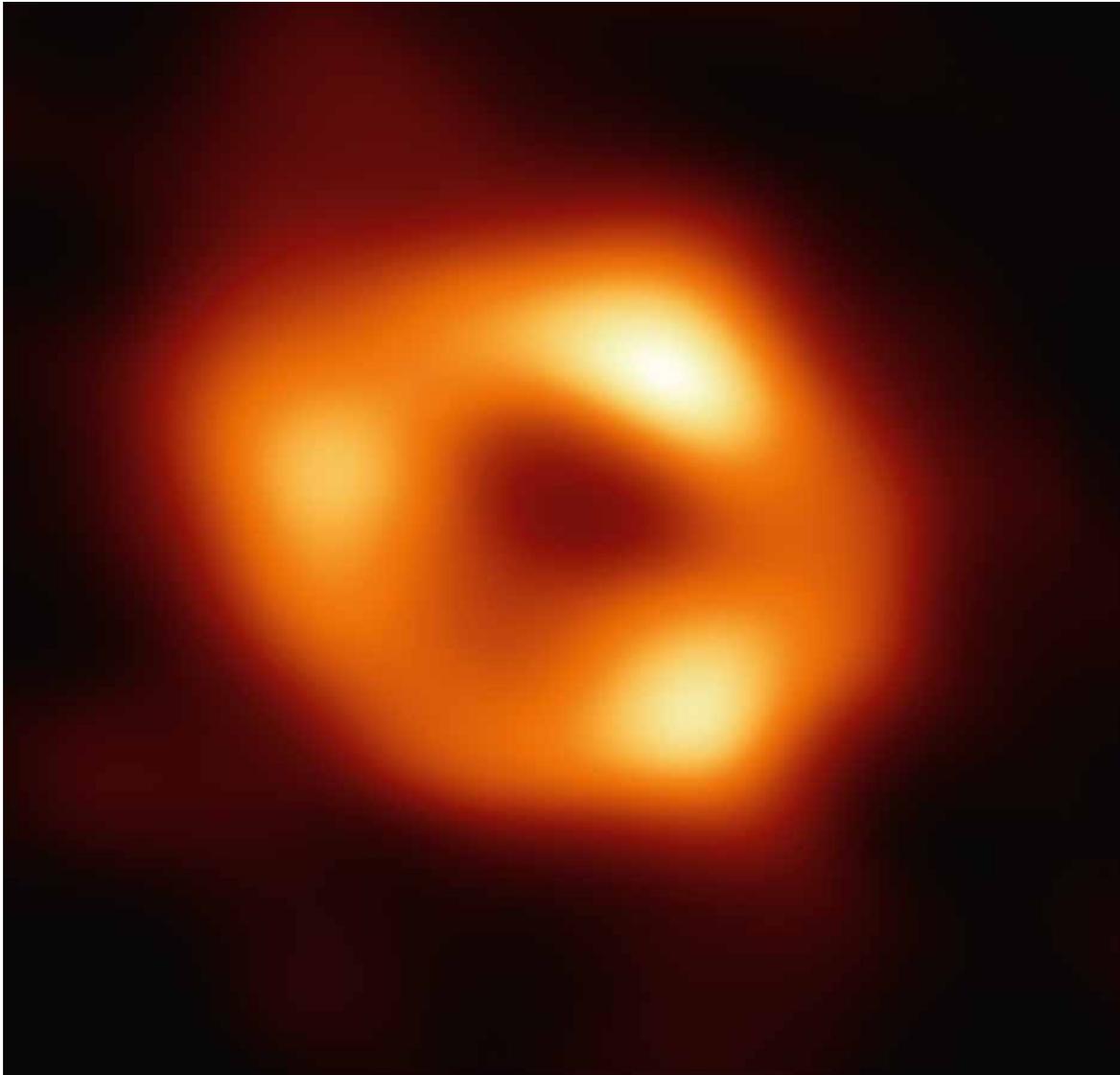


[www.mpg.de/16838013](http://www.mpg.de/16838013)



# BLICK AUF EINEN KOSMISCHEN DONUT

TEXT: HELMUT HORNUNG



80

BILD: EHT-KOLLABORATION

Feuerring im All: Dies ist das erste Bild von Sagittarius A\*, dem schwarzen Loch im Zentrum unserer Milchstraße. Gewonnen hat es das Event Horizon Telescope (EHT), zu dem auch das 12-Meter-Apex-Teleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie sowie die 30-Meter-Antenne des Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM) gehören. Die Aufnahme ist eine Falschfarbendarstellung und zeigt den Schatten des schwarzen Lochs, der von einer hellen, ringförmigen Struktur aus wirbelndem Gas umgeben ist.

Es sitzt tief im Herzen der Milchstraße, ist 27 000 Lichtjahre von der Erde entfernt und ähnelt einem Donut: So präsentiert sich das schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxis auf dem Bild, das Forschende mit dem Event Horizon Telescope (EHT) gewonnen haben.

Schon seit mehr als drei Jahrzehnten nehmen Astronominen und Astronomen das Zentrum der Milchstraße unter die Lupe und beobachten beispielsweise Sterne, welche um ein unsichtbares, kompaktes und sehr massereiches Etwas kreisen. Für diese Arbeiten wurden Andrea Ghez von der University of California sowie Reinhard Genzel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik im Jahr 2020 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Was die Forschenden mit ihren präzisen Messungen herausgefunden hatten, hat sich jetzt bestätigt: „Unsere Entdeckung zeigt, dass das Objekt im galaktischen Zentrum tatsächlich ein schwarzes Loch sein muss“, erklärt Anton Zensus, Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie und Gründungsvorsitzender des EHT-Aufsichtsrats. Das Bild liefere den ersten direkten visuellen Beweis dafür.

Das schwarze Loch selbst ist auf der Aufnahme zwar nicht zu sehen, weil es naturgemäß keine Strahlung ausstrahlt. Doch zeigt das glühende Gas, das um diese kosmische Schwarzkraftfalle herumwirbelt, eine verräterische Signatur – eine dunkle zentrale Region („Schatten“), die von einem hellen Ring umgeben ist. Dessen Licht wird durch die immense Gravitation gleichsam gebeugt.

Der Schatten besitzt den rund zweieinhalbfachen Durchmesser des sogenannten Ereignishorizonts – der Grenze des schwarzen Lochs, jenseits

derer kein Licht mehr entweichen kann. Er erscheint am Himmel unter einem Radius von zehn millionstel Bogensekunden – so groß wie eine Ein-Euro-Münze auf dem Mond. Damit durchmisst das galaktische schwarze Loch in Natur etwa 24 Millionen Kilometer.

Um das Massemonster abzubilden, wurden acht um den halben Globus verteilte Radioobservatorien zu einem einzigen virtuellen Teleskop von Erdgröße verbunden. Mit dieser Interferometrie genannten Methode beobachteten die Forschenden während mehrerer Nächte im April 2017 das dunkle Herz der Milchstraße, das die Bezeichnung Sagittarius A\* trägt. Bei einer Wellenlänge von 1,3 Millimetern sammelten die einzelnen Antennen über viele Stunden hinweg Daten. Zwei Hochleistungsrechner – einer am Max-Planck-Institut für Radioastronomie, der andere am US-amerikanischen Haystack Observatory – werteten diese aus.

Die aktuelle Beobachtung folgt auf die bereits im Jahr 2019 veröffentlichte erste Aufnahme eines schwarzen Lochs (M 87\*) im Zentrum der Galaxie Messier 87. Dass sich die Bilder der beiden Objekte gleichen, mag erstaunen: M 87\* liegt nämlich ungefähr 2000-fach weiter von uns entfernt als Sagittarius A\*. Allerdings besitzt das schwarze Loch in der fernen Galaxie deutlich mehr Masse und damit einen 1500-fach größeren Durchmesser als jenes in unserer Milchstraße. Deshalb erscheinen die beiden Abbilder am irdischen Firmament unter einem ähnlichen Winkel.

Bei Sagittarius A\* war die Datenauswertung schwieriger als bei M 87\*. Zwar strudelt das Gas praktisch mit derselben Geschwindigkeit um jedes der beiden schwarzen Löcher – fast so schnell wie das Licht. Doch während es Wochen braucht, um M 87\* zu umrunden, sind es bei Sagittarius A\*

nur wenige Minuten. Deshalb änderten sich Helligkeit und Struktur des Feuerrings während der Beobachtungen sehr rasch, was das Foto „verwackelte“. Die Lösung: Das Bild ist keine Momentaufnahme, sondern der Mittelwert aus Hunderten von Bildern, die an zwei Tagen im April 2017 am Event Horizon Telescope gewonnen wurden. Dass wir uns mit der Erde in der galaktischen Ebene befinden und heißes Gas mit geladenen Teilchen und Magnetfeldern in der Sichtlinie „herumtanzt“, erschwerte die Datenanalyse zusätzlich.

## Beobachtungen bestätigen das Modell

Anhand der Aufnahme von Sagittarius A\* lassen sich Modelle darüber testen, wie sich Schwerkraft und Materie in der Umgebung von solchen Massemonstern verhalten. „Dank vorhergehender Messungen wie denen von Reinhard Genzel kennen wir sowohl die Entfernung als auch die Masse des schwarzen Lochs sehr genau“, sagt Michael Kramer, Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie und einer der Leiter des europäischen Black-Hole-Cam-Projekts innerhalb des Event Horizon Telescope. Aus diesem Grund habe man die erwartete Schattengröße berechnen können.

„Der vom EHT-Team ermittelte Wert stimmt mit dem Modell eines schwarzen Lochs mit der Masse von vier Millionen Sonnen überein, wie sie meine Gruppe bestimmt hat“, sagt denn auch Max-Planck-Direktor Genzel, der die Arbeit seiner Kolleginnen und Kollegen als „wunderbare Bestätigung unserer Beobachtungen“ sieht. In Zukunft gehe es darum herauszufinden, wie schnell das schwarze Loch rotiert. Und auch die Neigung der Rotationsebene sei noch unsicher.

81





82

Max-Planck-Forschende kooperieren mit Partnern in mehr als 120 Ländern. Hier schreiben sie über ihre persönlichen Erfahrungen und Eindrücke. Henrik-Alexander Schubert, Doktorand am Rostocker Max-Planck-Institut für demografische Forschung, ist in die schwedische Hauptstadt gereist, eine der ersten Adressen für Demografen. Der Max-Planck-Forscher erzählt von ausgelassenen Festen, produktiven Pausen und verrät, wo man die besten Zimtschnecken der Stadt bekommt.

Viele Menschen haben eine genaue Vorstellung davon, wie viele Kinder sie einmal haben möchten. In Deutschland sind das im Durchschnitt 1,96. Die tatsächliche Kinderzahl liegt jedoch nur bei 1,53 je Frau. Was ist der Grund für diese Differenz, und was hat einen Einfluss darauf, wie viele Kinder jemand bekommt? Mit Fragen wie diesen beschäftigen wir uns am

Rostocker Max-Planck-Institut für demografische Forschung. Ich vergleiche in meiner Doktorarbeit die Fertilität bei Männern in achtzehn verschiedenen entwickelten Ländern und suche nach Faktoren, die für die Kinderzahl bestimmend sind. Dafür analysiere ich am Rechner demografische Registerdaten aus unterschiedlichen Zeiträumen. So zeigt sich, dass nach Einschnitten wie der Finanzkrise oder der Coronapandemie die Geburtenzahl insgesamt zurückgeht, aber nur kurzfristig. Dagegen haben regionale Ungleichgewichte auf dem Partnermarkt langfristige Auswirkungen: Für Männer in ländlichen Gebieten etwa ist es oft schwierig, Partnerinnen zu finden, da viele Frauen in die Städte abwandern. Was dieses Forschungsfeld für mich so spannend macht, ist der multidisziplinäre Ansatz. Denn um die Daten richtig interpretieren zu können, braucht die Demografie immer Anknüpfungspunkte zu anderen Wissenschaften, etwa Politik oder Biologie. Jede Diszi-

Wenn der Sommer zu Ende geht, feiern die Schweden ihr Krebsfest *kräftskiva*. Kulinarischer Mittelpunkt sind die Schalentiere, traditionell mit viel Dill zubereitet.

plin betrachtet ein und dieselbe Frage aus einem anderen Blickwinkel.

Weltweit gibt es nur wenige Unis und Institute mit einem Schwerpunkt auf demografischer Forschung. Neben dem Rostocker Max-Planck-Institut zählt dazu die Universität Stockholm. Sie ist aus diesem Grund auch Partnerin der International Max Planck Research School for Population, Health and Data Science, an der ich promoviere. Ich hatte Stockholm bereits während einer Reise nach dem Abitur kennengelernt und war sofort begeistert. Der Beiname „Venedig des Nordens“ trifft voll und ganz zu: Es gibt unzählige Brücken und Stege, und vom Wasser ist man nie weit entfernt. Stockholm gab den Anstoß, dass ich neben dem Studium anfang, Schwedisch zu lernen. Für jemanden mit der Muttersprache Deutsch ist das gar nicht so schwer: Viele Wörter sind ähnlich, und die schwedische Grammatik ist einfacher als die deutsche. Meine Sprachkenntnisse haben sich

## STOCKHOLM, SCHWEDEN

jedenfalls als sehr nützlich erwiesen. Dass ich mich an der Uni in Stockholm gleich wohlfühlte, lag auch daran, wie entspannt die Schweden sind. Ganz wichtig ist die Kaffeepause – auf Schwedisch *fika*. Statt zwischen benachbarten Büros ständig Mails hin- und herzuschicken, trifft man sich auf einen Kaffee, redet miteinander und isst einen Apfel oder eine Zimtschnecke. Danach ist man gleich wieder viel produktiver. Die besten Zimtschnecken gibt es übrigens in der Bäckerei Ingrid im Stadtteil Östermalm. Apropos Essen: Der fermentierte Dosenfisch, den die Schweden so lieben, ist, ehrlich gesagt, gar nicht mein Geschmack. Dafür bekommt man vor allem an der Küste wunderbare frische Fischgerichte!

Die Schweden sind sehr naturverbunden. Und sie feiern gern! Einige Feste habe ich miterlebt. Am bekanntesten ist wohl Mittsommer, das ich gemeinsam mit Freunden in einem idyllischen roten Holzhäuschen auf dem Land ver-

bracht habe. Es gab Tanz- und Gruppenspiele, fast wie auf einem Kindergeburtstag. Im August feiern die Schweden das Krebsfest *kräftskiva*. Dazu trifft sich die ganze Familie an einer langen Tafel im Freien. Jeder bekommt einen Papierhut auf den Kopf. Man singt gemeinsam ein Lied, trinkt einen Schnaps und isst einen Krebs, und das immer wieder. Natürlich ist die Stimmung bald sehr ausgelassen!

Ansonsten ist die schwedische Wesensart eher ruhig und zurückhaltend. Kritik wird immer sehr höflich verpackt. Statt jemandem zu sagen, dass er einen Fehler gemacht hat, heißt es dann: „Das könntest du auch anders machen.“ Um Leute kennenzulernen, habe ich in Stockholm angefangen, Floorball zu spielen. Freunde zu finden war trotzdem nicht leicht: Meistens trifft man auf eingeschworene Gruppen und hat es schwer reinzukommen. Wenn man aber erst einmal Freundschaft geschlossen hat, dann ist die umso anhaltender.



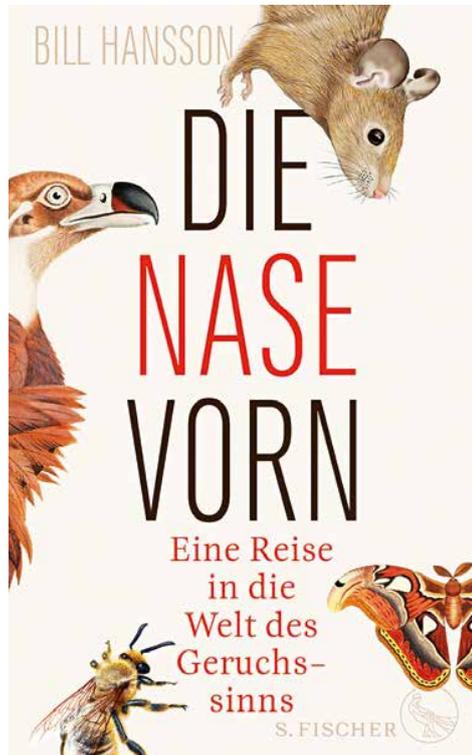
FOTO: PRIVAT

Henrik-Alexander Schubert

26, hat an der Universität in Rostock Politikwissenschaften und Soziologie studiert, bevor er seinen Schwerpunkt auf die Demografie legte. Derzeit promoviert er am Max-Planck-Institut für demografische Forschung in Rostock. Im Arbeitsbereich „Fertilität und Wohlbefinden“, geleitet von Mikko Myrskylä, vergleicht er Daten aus achtzehn Ländern, um herauszufinden, welche Faktoren die Fertilität bei Männern beeinflussen.

## ALLES RIECHT

Beinahe alles auf der Erde dünstet Moleküle aus. Die Luft, die Menschen, Tiere und Pflanzen atmen, ist also voller Gerüche. Aber auch im Wasser duftet es. Kröten und Frösche besitzen deshalb eine Nase mit zwei Kammern: die eine für das Riechen über, die andere für das Riechen unter Wasser. Mit solchen und anderen verblüffenden Erkenntnissen überrascht Bill Hansson seine Leserschaft am laufenden Band. Der Autor ist Direktor am Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena und erforscht seit vielen Jahren den Geruchssinn verschiedener Organismen. Hansson erklärt kurzweilig und verständlich die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse rund um das Thema Riechen, verschweigt zugleich aber nicht, wo die Forschung derzeit noch im Dunkeln tappt. Welche Rolle unsere Nase für die Bindung zu unseren Kindern spielt, warum Hunde so außerordentlich gut riechen und dass selbst Pflanzen „riechen“ können – all dies beschreibt Hansson so unterhaltsam wie lehrreich. Das erste Kapitel seines Buches widmet der Autor dem, was es bedeutet, im Zeitalter des Anthropozäns auf seine Nase angewiesen zu sein. Zerfallendes Plastik, höhere Mengen an Kohlendioxid, steigende Temperaturen – all dies verändert die Welt der Gerüche so rasant wie selten zuvor in der Erdgeschichte. Was das



für das Leben auf der Erde bedeutet, kann auch Bill Hansson nur vermuten – wahrscheinlich aber nichts Gutes.

Harald Rösch

---

Bill Hansson  
*Die Nase vorn*  
400 Seiten, S. Fischer Verlag  
24,00 Euro

## DAS FINSTERE UNIVERSUM

Was ist das nur für ein Stoff, aus dem ein Viertel des Universums besteht? Seit Jahrzehnten fahnden Forschende nach dieser sogenannten Dunklen Materie, die fester Bestandteil des kosmologischen Standardmodells ist und ihre Existenz allein durch die Wirkung ihrer Schwerkraft verrät. Bisher ließ sich jedoch nicht ein einziges Dunkle-Materie-Teilchen nachweisen: „Und das, obwohl mutmaßlich in jeder Sekunde rund eine Milliarde Partikel der Dunklen Materie unseren Körper durchqueren“, wie Thomas Bürke im Vorwort zu seinem neuen Buch schreibt. Darin beleuchtet der renommierte Wissenschafts-

journalist mit Akribie und Sachkenntnis dieses ebenso spannende wie rätselhafte Thema. Der Autor taucht zunächst in die Geschichte ein und berichtet von Fritz Zwicky, der aus der Bewegung von Galaxien bereits im Jahr 1933 den ersten eindeutigen Hinweis auf das Vorhandensein eines unsichtbaren Stoffs fand. Pionierarbeit leistete später auch Vera Rubin, die eine präzise Rotationskurve der Andromedagalaxie erstellte und damit ebenfalls eindeutige Anzeichen für die Dunkle Materie entdeckte. Weniger erfolgreich verliefen hingegen bisher die Bemühungen, diese finstere Seite des Weltalls dingfest zu machen.

Thomas Bürke beschreibt die ausgeklügelten Suchmethoden und lässt vier Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler – allesamt aus Max-Planck-Instituten – selbst zu Wort kommen. Nicht zuletzt wegen dieser Interviews ist das leicht verständliche Buch ganz nah am Puls der Forschung.  
Helmut Horning

---

Thomas Bürke  
*Was ist Dunkle Materie?*  
256 Seiten, Franckh-Kosmos Verlag  
22,00 Euro





# NEU ERSCHIENEN

---

## LOCKERE PHYSIK

*Die Gottes-Formel* lautet der auf den ersten Blick etwas hoch gegriffene Titel des neuesten Buchs von Michio Kaku. Der US-amerikanische Physiker hat sich in der populärwissenschaftlichen Literatur einen hervorragenden Namen erworben – und macht diesem auch in seinem aktuellen Werk alle Ehre. Denn darin geht es um nicht weniger als eine „Theorie von allem“ und um das Bestreben, den „Geist Gottes“ zu erfassen, wie es Albert Einstein einmal formulierte. Das gelingt mit seiner Relativitätstheorie ebenso wenig wie mit der von Max Planck ersonnenen Quantenphysik. Und um das Dilemma komplett zu machen, passen diese beiden Säulen des physikalischen Weltgebäudes nicht zusammen. So haben Forschende vor fünf Jahrzehnten die Stringtheorie aus dem Hut gezaubert, die Einstein und Planck sozusagen miteinander versöhnen soll. Heftig umstritten und heiß diskutiert, ist sie für den Laien schwer verdauliche Kost – es sei denn, er greift zu Kakus Buch. Denn der Autor bietet nicht nur einen lockeren Streifzug durch die Physikgeschichte, sondern beschreibt die Stringtheorie auch derart anschaulich, dass es eine wahre Freude ist. Physik mit hohem Unterhaltungswert!

*Helmut Hornung*

---

Michio Kaku  
*Die Gottes-Formel*  
240 Seiten, Rowohlt Verlag  
24,00 Euro



85

## GOETHE'S SOMMERMÄRCHEN

Ach, Italien! Nach zwei Coronasommern strömen jetzt wieder viele Deutsche in ihr Sehnsuchtsland. Den Trend hat kein Geringerer als Johann Wolfgang von Goethe gesetzt, als er 1786 zu seiner italienischen Reise aufbrach. Sein Gedicht *Kennst du das Land, wo die Zitronen blühen?* und sein Reisetagebuch machten Italien zum Traumziel für Generationen. Golo Maurer, Bibliotheksleiter der Bibliotheca Hertziana, des Max-Planck-Instituts für Kunstgeschichte in Rom, nimmt Goethes *Italienische Reise* und deren Wirkungsgeschichte gründlich unter die Lupe und räumt dabei mit so manchem Mythos auf: Anders als es der Dichturfürst beschreibt, war seine Tour eigentlich eine Flucht aus der Midlife-Crisis – heimlich, unter falschem Namen und ohne Rücksicht auf Freundeskreis und Brotgeber. Maurer beschreibt, wie Goethe log und taktierte, beschönigte und stilisierte und gleichwohl in Italien zu sich selbst fand. Nach

Goethes Tod eiferte das deutsche Bildungsbürgertum dem großen Beispiel nach und reiste auf dessen Spuren gen Süden. Golo Maurer schreibt fundiert, dabei aber schwungvoll und unterhaltsam von Goethes Schwierigkeiten in Weimar und von dessen Selbstfindungstrip nach Rom bis hin zu den zahlreichen Nachahmern im 19. und 20. Jahrhundert, von denen manche vom vermeintlichen Traumland bitter enttäuscht wurden. Teilweise sind Maurers Ausführungen zwar sehr ausführlich geraten – doch für lange Strandtage oder die Siesta im kühlen Urlaubsdomizil ist das Buch auf jeden Fall die passende Lektüre.

*Mechthild Zimmermann*

---

Golo Maurer  
*Heimreisen*  
544 Seiten, Rowohlt Verlag  
28,00 Euro

# FÜNF FRAGEN

## ZU PAPAGEIEN

AN AUGUSTE VON BAYERN



86

Papageien gehören zu den intelligentesten Lebewesen auf der Erde. Gleichzeitig sind sie eine der am stärksten bedrohten Tiergruppen. Werden die faszinierenden Tiere das große Artensterben unserer Zeit überleben? Auguste von Bayern untersucht die Denkfähigkeit verschiedener Papageienarten und kennt die Bedrohungen und Bedürfnisse der Tiere.

### **Frau von Bayern, was erforschen Sie mit den Papageien?**

AUGUSTE VON BAYERN Meine Arbeitsgruppe will mit ihrer Hilfe die Entwicklung von Intelligenz und komplexer Kommunikation innerhalb der Wirbeltiere besser verstehen und herausfinden, wie Sprache mit Intelligenz zusammenhängt. Hinzu kommt, dass Papageien extrem leicht Laute lernen und imitieren können. Diese Fähigkeiten könnten ein Schlüssel dafür sein, die Evolution der Sprache beim Menschen zu enträtseln.

### **Was ist die größte Gefahr für die Papageien?**

Die stärkste Bedrohung ist die Zerstörung ihres Lebensraums. Das ist nicht verwunderlich, denn die meisten Arten leben in tropischen und subtropischen Regenwäldern, und diese sind eben leider besonders gefährdet. Ein weiteres Problem ist der Haustierhandel. Und manche Papageien, darunter sogar vom Aussterben bedrohte Arten, wer-

den wegen ihrer Federn oder einfach nur als Sport gejagt.

### **Welche Arten sind besonders bedroht?**

Von den 387 Papageienarten, die man heute kennt, stehen 109 auf der Roten Liste, also fast ein Drittel. Davon sind 17 „vom Aussterben bedroht“ und 38 „bedroht“. Dazu kommen noch 16 Arten, von denen wir wissen, dass sie in den letzten Jahrhunderten ausgestorben sind. Besonders bedroht sind zum Beispiel der durch den Animationsfilm *Rio* berühmt gewordene brasilianische Spix-Ara, der inzwischen in der Natur ausgestorben ist; außerdem die Puerto-Rico-Amazone oder der möglicherweise schon ausgestorbene Diademlori aus Neukaledonien.

### **Welche Organisationen kümmern sich denn um den Erhalt von Papageien?**

Birdlife International, World Parrot Trust, Parrots International, um nur einige zu nennen. Auch die Loro-Parque-Stiftung, mit der ich bei meiner Forschung zusammenarbeite, setzt sich für den Schutz von Papageien ein. Die Stiftung unterstützt seit dreißig Jahren Schutzprojekte für dreißig bis vierzig Papageienarten und einige Meeressäuger mit dem Ziel, bedrohte Arten vor dem Aussterben zu retten. Neun Papageienarten konnten dank ihres Engagements vor dem Aussterben bewahrt werden, fünf da-

von wurden sogar in ihrem Bedrohungsstatus herabgestuft. Dazu kommt die Papageienzucht der Stiftung, die als artenreichste Papageiensammlung der Welt internationale Auswilderungsprogramme unterstützt.

### **Papageien sind beliebte Haustiere. Wie schaut eine artgerechte Haltung der Vögel aus?**

Papageien sollten eigentlich nur von Experten gehalten werden. Ohne die internationalen Nachzuchtprogramme von Zoos und Profizüchtern wie der Loro-Parque-Stiftung würden einige Arten in naher Zukunft aussterben. Als Haustiere sind viele Papageienarten hingegen denkbar ungeeignet. Sie brauchen viel Platz und sollten nicht allein leben. Außerdem sind die Tiere oft unerbittlich laut. Sie entwickeln leicht Marotten wie Federausrupfen oder unaufhörliches Schreien, wenn sie ihr natürliches Verhaltensrepertoire und ihren Bewegungs- und Knabberdrang nicht ausleben können oder zu wenig Aufmerksamkeit erfahren. Man muss sich deshalb vorher gut überlegen, ob man diese Ansprüche über viele Jahre hinweg erfüllen kann. Wer einen Papageien hält, nimmt quasi ein Kleinkind bei sich auf, das nie erwachsen wird und viel mehr schreit.

*Interview: Harald Rösch*

Auguste von Bayern leitet die Forschungsgruppe „Vergleichende Kognitionsbiologie“ am Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz (in Gründung).

- 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 82000 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 23900 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6900 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2021 umfasste insgesamt 2,0 Milliarden Euro. Die Max-Planck-Institute betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die Max-Planck-Gesellschaft ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.

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



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

