

Max Planck FORSCHUNG



Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft **I. 2018**



Parasiten

INTERNATIONALES RECHT
Auf Fischzug
im Weltraum

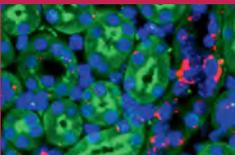
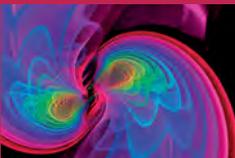
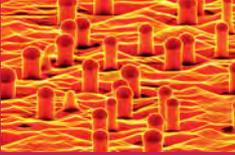
POLYMERFORSCHUNG
Plastik –
gut verträglich

METEOROLOGIE
Kahlschlag
am Klima

KRIMINALITÄT
Strategien gegen
Spione



Connecting Science and Business.



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

Connecting Science and Business





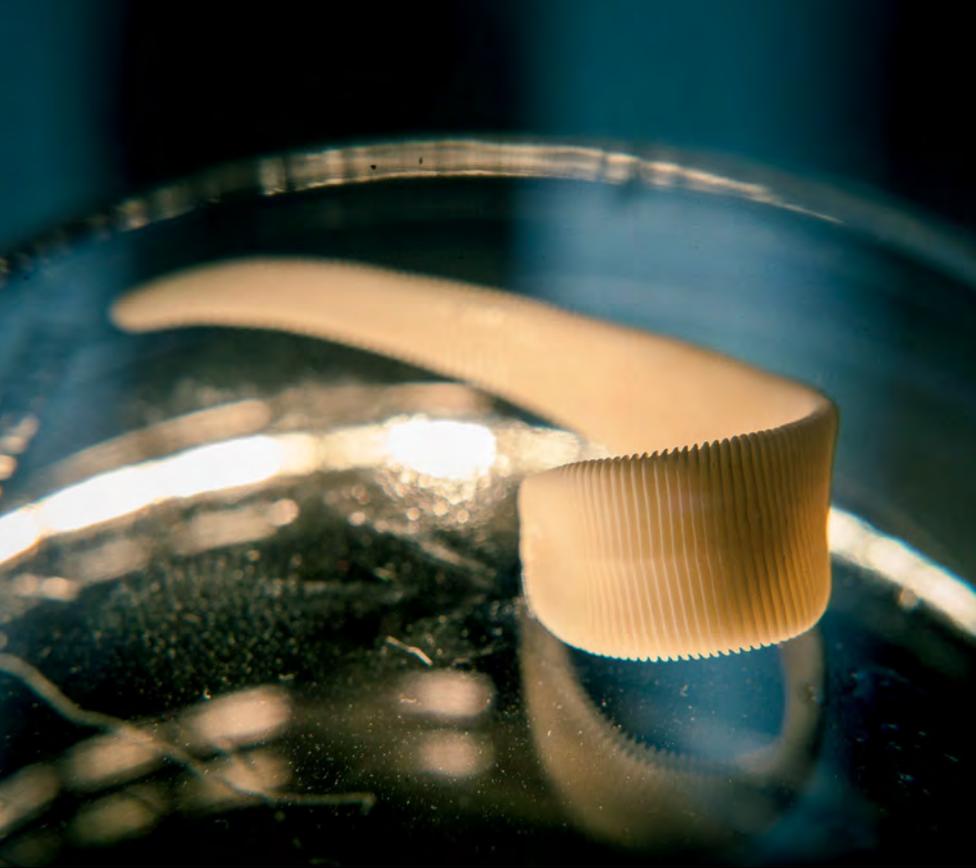
Foto: Sonja Metzger / Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie

Alltag im Dschungel

Westafrika, Republik Côte d'Ivoire, unweit der Grenze zu Liberia: Zwölf Autostunden von der Hafenstadt Abidjan, drei Stunden auf unbefestigter Piste vom nächsten Dorf entfernt liegt, mitten im tropischen Regenwald des Tai-Nationalparks, das Camp der Max-Planck-Forscher. Bereits seit vielen Jahren beobachten hier die Wissenschaftler um Christophe Boesch drei einander benachbart lebende Schimpansengruppen mit zusammen ungefähr 100 Tieren.

Alle diese Tiere sind so sehr an die Anwesenheit von Menschen gewöhnt, dass sie von diesen so gut wie keine Notiz mehr nehmen – man könnte sagen, die Forscher gehören zum Inventar. Dies zu erreichen, dauert in der Regel mehrere Jahre, in denen sich die Wissenschaftler den Primaten behutsam annähern. Erst wenn jeder einzelne Affe sich auch in Gegenwart der Menschen so verhält, als wäre er allein, kann die eigentliche Forschung beginnen.

Die Wissenschaftler folgen den Schimpansengruppen überallhin und beobachten deren Alltag, verhalten sich aber den Affen gegenüber absolut neutral: Sie füttern sie nicht, sie essen nicht in Gegenwart der Schimpansen, sie spielen nicht mit den Jungtieren – selbst wenn diese neugierig sind und sich den Menschen von sich aus nähern. Und sie kommen niemals in Körperkontakt mit den Tieren. Letzteres ist auch im Hinblick auf die Gesundheit der Affen von größter Bedeutung: Schon eine für uns harmlose Erkältung kann eine komplette Schimpansenfamilie das Leben kosten. Daher gelten strikte Verhaltensgebote und Hygienemaßnahmen: Jeder, der ins Camp kommt, muss gegen eine Vielzahl von Krankheiten geimpft sein; zusätzlich verbringt er oder sie zunächst eine fünftägige Quarantäne in einer Außenstation des Camps. Niemand, der auch nur leichte Anzeichen einer Infektion zeigt, darf in den Wald zu den Affen. Vor Ort hält jeder Beobachter immer mindestens sieben Meter Abstand zu den Tieren – und trägt stets einen Mundschutz, auch wenn dies bei 95 Prozent Luftfeuchtigkeit und Temperaturen von mehr als 30 Grad recht unangenehm werden kann.



18 PARASITEN

18 Gene als Schmarotzer

Parasiten gibt es nicht nur im Pflanzen- und Tierreich, sie sind auch ein Teil von uns selbst. Unser Erbgut enthält Unmengen kleiner Abschnitte, die sich auf seine Kosten vervielfältigen, die sogenannten Transposons. Forscher am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie wollen den Kopiervorgang genauer verstehen. Denn diese Transposons können Krankheiten auslösen und sind vielleicht ein wichtiger Motor der Evolution.

26 Im Stichling ist der Wurm drin

Rund 40 Prozent aller Arten auf der Erde leben parasitisch. Allein ein Fisch wie der Dreistachlige Stichling wird von bis zu 25 verschiedenen Parasiten geplagt. Einer davon hat es Wissenschaftlern am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie besonders angetan: der Bandwurm *Schistocephalus solidus*. Sie erforschen die vielfältigen Tricks, mit denen Wirt und Parasit versuchen, sich gegenseitig auszuspielen.

34 Gefahr aus der Pfütze

Zugegeben, das Objekt ist nicht gerade appetitlich: „Kotälchen“ – kleine parasitische Würmer, die im Darm eines Wirts leben und diesem unter Umständen arg zusetzen. Der so titulierte Zwergfadenwurm *Strongyloides stercoralis* ist für Forscher am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie dennoch faszinierend, denn er hat einen einzigartigen Lebenszyklus. Und bis heute weiß niemand so recht, warum.

ZUM TITEL Bis zu fünf Zentimeter lang kann ein Peitschenwurm der Gattung *Trichuris* werden. Der Darmparasit besteht aus einem fadenförmigen Vorderende und einem daran anschließenden dickeren Hinterende mit den inneren Organen. So erinnern die Würmer an Peitschen. Einige Arten infizieren Tiere wie Hunde, Katzen oder Schweine. Auch der Mensch kann Wirt für Peitschenwürmer sein. Eine Infektion verläuft jedoch meist unauffällig. Erst bei starkem Befall können Darmblutungen und Durchfall auftreten.

Inhalt



48 Im Laufschrift: Die Astrochemikerin Paola Caselli hat ihre beruflichen Ziele stets konsequent verfolgt.

PERSPEKTIVEN

- 06** Ethik, Wirtschaft und sozialer Wandel
- 06** Hohe Auszeichnung für Wissenschaftshistorikerin
- 07** „In zehn Jahren werden wir wissen, welche Tiere Naturkatastrophen vorhersagen können“
- 08** Rostschutz aus der Nanokapsel
- 08** Möglicher Tuberkuloseimpfstoff vor letzter Hürde
- 09** Fundament für Heidelberger Forschungsnetzwerk
- 09** Ins Netz gegangen

ZUR SACHE

- 10** **Auf Fischzug im Weltraum**
Luxemburg hat ein Gesetz erlassen, das Firmen Anspruch auf im Weltraum gewonnene Rohstoffe garantiert. Doch die weitblickende Entscheidung ist in Hinblick auf das Völkerrecht mehr als zweifelhaft, wie unser Autor erläutert.

FOKUS

- 18** Gene als Schmarotzer
- 26** Im Stichling ist der Wurm drin
- 34** Gefahr aus der Pfütze



TECHMAX

Mikroplastik im Meer – warum Chemiker an bioabbaubaren Kunststoffen forschen



56 Im Überfluss: Berge von Plastikmüll belasten die Umwelt und können Jahrhunderte überdauern.



64 Im Wald: Indem er Forstwirtschaft betreibt, verändert der Mensch die globale Kohlenstoffbilanz.



72 Im Dunkeln: Wirtschaftsspione aufzuspüren, scheidet für deutsche Ermittler oft an den Landesgrenzen.

SPEKTRUM

- 42** Dramatischer Rückgang von Orang-Utans
- 42** Grüne Chemie gegen Malaria
- 43** Mit dem richtigen Riecher
- 43** Migration der Sterne
- 43** Wirbelstürme im Herzen
- 44** Milliroboter mit Bewegungstalent
- 44** Verschaltete Sinneseindrücke
- 44** Erreger aus der Kolonialzeit
- 45** Relikt des Urknalls
- 45** Die Wege der Glockenbecher
- 45** Gehirne von Jazz- und Klassikpianisten ticken unterschiedlich
- 46** Neandertaler als Künstler
- 46** Ein Puzzle aus Pflanzenzellen
- 47** Menschen behindern wandernde Tiere
- 47** Erbgut von Axolotl und Plattwurm entschlüsselt

PYHSIK & ASTRONOMIE

- 48 Im Chemielabor des Kosmos**
Zur Person: Paola Caselli

MATERIAL & TECHNIK

- 56 Plastik – gut verträglich**
Kunststoffe sind praktisch – nicht zuletzt weil sie sehr langlebig sind. Doch gelangen sie in die Umwelt, wird genau das zum Problem. Wissenschaftler am Mainzer Max-Planck-Institut für Polymerforschung entwickeln alternative Stoffe, die von Mikroorganismen zerlegt werden, sobald sie ihren Zweck erfüllt haben.

UMWELT & KLIMA

- 64 Kahlschlag am Klima**
In Debatten um die Erderwärmung steht eine Ursache im Mittelpunkt: die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe. Doch der Mensch verändert das Klima auch, indem er Wälder rodet und Ackerbau, Forstwirtschaft sowie Viehzucht betreibt. Die Folgen untersuchen Forscher am Max-Planck-Institut für Meteorologie.

KULTUR & GESELLSCHAFT

- 72 Strategien gegen Spione**
Gerade kleine und mittlere Unternehmen werden immer wieder Opfer krimineller Wettbewerber oder Zielscheibe ausländischer Geheimdienste. Doch die meisten Fälle bleiben im Dunkeln. Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für ausländisches und internationales Strafrecht untersuchen unter anderem das Ausmaß dieser Wirtschaftsspionage sowie Abwehrstrategien der Betriebe.

RUBRIKEN

- 03 Orte der Forschung**
- 16 Post aus – Isparta, Türkei**
Die Sehnsucht nach Rosen
- 78 Rückblende**
Moleküle – auf Eis gelegt
- 80 Neu erschienen**
- 80 Robert M. Sapolsky, Gewalt und Mitgefühl
- 81 James Cheshire, Oliver Uberti, Die Wege der Tiere
- 82 Wolf Singer, Matthieu Ricard, Jenseits des Selbst
- 83 Standorte**
- 83 Impressum**

Ethik, Wirtschaft und sozialer Wandel

Neues Max Planck Center mit der Universität Cambridge eingeweiht



Beifall für deutsch-britische Initiative: Max-Planck-Präsident Martin Stratmann (links) und Stephen Toope, der Vizekanzler der University of Cambridge, bei der Einweihung des gemeinsamen Zentrums.

Wie wirken sich moralische und ethische Überzeugungen auf die lokale Wirtschaft aus, und wie beeinflussen sie zugleich den globalen Kapitalismus? Diese Fragen stehen im Mittelpunkt der Forschung im Max-Planck-Cambridge Centre for Ethics, Economy and Social Change, das Anfang März offiziell eingeweiht wurde. Antworten darauf suchen in dem gemeinsamen Projekt Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der britischen Eliteuniversität Cambridge sowie der Max-Planck-Institute für ethnologische Forschung in Halle und zur Erforschung multireligiöser und multiethnischer Gesellschaften in Göttingen. Max-Planck-Präsident Martin Stratmann betonte bei der Einweihungsfeier seine Freude darüber, „dass wir in einer Zeit der vom Brexit verursachten Unsicherheit eine weitere sichtbare Zusammenarbeit mit britischen Spitzenwissenschaftlern begründet haben“. Die vier Co-Direktoren, James Laidlaw und Joel Robbins von der University of Cambridge sowie die Max-Planck-Forscher Chris Hann und Peter van der Veer, sind sich bewusst, dass seit der globalen Finanzkrise großes öffentliches Interesse an den ethischen Grundlagen des Kapitalismus besteht. Ein Ziel ihrer Arbeit ist daher auch, neue Ansätze zur Beantwortung drängender sozialer Fragen zu erarbeiten.

Hohe Auszeichnung für Wissenschaftshistorikerin

Max-Planck-Direktorin Lorraine Daston erhält den israelischen Dan-David-Preis

Lorraine Daston, langjährige Direktorin am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin, wird mit einer renommierten internationalen Auszeichnung für ihre wissenschaftliche Arbeit geehrt. Den mit einer Million US-Dollar (mehr als 800 000 Euro) dotierten Preis erhält sie für ihre „bahnbrechenden historischen Arbeiten zu Ideen und Praktiken von Rationalität“, mit denen sie unter anderem gezeigt hat, „wie sich vermeintlich universelle Begriffe wie ‚Fakt‘ oder ‚Beweis‘ seit dem 17. Jahrhundert entwickelt haben“, teilte die Jury in ihrem Statement mit. Besonders hervorgehoben wird das von Lorraine Daston zusammen mit Peter Galison herausgegebene Buch *Objektivität*, das nach Ein-

schätzung der Preisstiftung „zu den am meisten diskutierten und rezensierten Werken der Wissenschaftsgeschichte“ gehört.

Der nach dem israelischen Geschäftsmann Dan David benannte Preis wird jedes Jahr an Menschen vergeben, die sich im technologischen, wissenschaftlichen, sozialen oder kulturellen Bereich besonders hervorgetan haben. In diesem Jahr wurden in den Bereichen Wissenschaftsgeschichte, Bioethik und personalisierte Medizin je drei Wissenschaftler ausgezeichnet.

International anerkannt: Lorraine Daston hat sich mit ihrer Forschung über die Kulturgeschichte der Rationalität einen Namen gemacht.



„In zehn Jahren werden wir wissen, welche Tiere Naturkatastrophen vorhersagen können“

Interview mit Martin Wikelski über den geglückten Transport der Icarus-Antenne zur *Internationalen Raumstation*

Mitte dieses Jahres soll es starten: Icarus – das erste satellitengestützte Programm zur Erforschung von Tierwanderungen. Mithilfe kleinster Sender, die ihre Daten an die *Internationale Raumstation (ISS)* schicken, wollen Wissenschaftler um Martin Wikelski vom Max-Planck-Institut für Ornithologie in Radolfzell künftig ergründen, nach welchen Gesetzen sich die unterschiedlichen Tierarten bewegen. Seit Mitte Februar befinden sich die beiden wesentlichen Komponenten der Icarus-Mission im All. Zuletzt brachte eine Sojus-Rakete die Antennen von Icarus zur ISS. Martin Wikelski erzählt vom ersten Countdown seines Lebens und wie es mit dem Projekt weitergeht.

Herr Wikelski, Sie waren beim Raketenstart in Baikonur dabei. Was haben Sie in dem Moment empfunden? Es stand ja viel auf dem Spiel.

Martin Wikelski: Der Weltraumbahnhof mitten in der kasachischen Steppe ist schon ein ganz besonderer Ort. Wenn man dann neben einem der riesigen Tore steht und die Rakete aus dem Hangar gerollt kommt, ist einem schon ein wenig mulmig zumute. Meine Kollegen und ich haben so viel Zeit und Energie in die Entwicklung von Icarus gesteckt – all das kann in Sekunden in Rauch aufgehen. Wir wissen ja schließlich, dass nicht jeder Start klappt.

Nachdem die Antenne sicher auf der ISS angekommen ist – was geschieht nun mit ihr? Zunächst wird sie innerhalb des russischen Moduls der Raumstation zwischengelagert. Im August wird sie dann auf der Außenseite montiert. Das ist noch mal ein kritischer Augenblick. Wenn beim Weltraumspaziergang der beiden russischen Kosmonauten Oleg Artemyev und Sergey Prokopiev alles gut geht, haben wir die größte noch ausstehende Hürde bewältigt.

Für Icarus ist 2018 ja das entscheidende Jahr. Worauf freuen Sie sich denn am meisten in den kommenden Monaten?

Die erste Datenübertragung von der ISS – ganz klar! Wenn wir die ersten Testdaten

von der Raumstation empfangen und wissen, dass das System funktioniert, werde ich für einen Moment der glücklichste Mensch der Welt sein. Dann testen wir noch einmal zwei Monate lang, ob die Antennen und der Bordcomputer funktionieren und die Datenübertragung klappt. Und dann kann es im Herbst oder Ende des Jahres endlich losgehen.

Mit Icarus können Wissenschaftler erstmals Tausende von Tieren auf ihren Reisen rund um den Globus beobachten – und das über Monate und Jahre hinweg, rund um die Uhr. Was sind die drängendsten Fragen, die Icarus beantworten kann?

An erster Stelle würde ich da die Zugvögel nennen. Ihre Zahl nimmt weltweit gerade so dramatisch ab, und oft wissen wir weder, wo sie verschwinden, noch, warum. Wenn wir hier nicht schnell Antworten bekommen, damit wir Gegenmaßnahmen ergreifen können, wird es für viele Arten zu spät sein. Dasselbe gilt für die massiv ausgebeuteten Fischbestände sowie für viele Meeressäuger in den Ozeanen. Außerdem müssen wir dringend mehr darüber wissen, wie Tiere Krankheitserreger verbreiten. Wie kommt die Vogelgrippe nach Europa? In welchen Tieren kommt das Ebolavirus vor? Künftig wollen wir deshalb mit Icarus die Flugrouten von Wasservögeln in Asien und von Flughunden in Afrika verfolgen. Beide gelten als mögliche Überträger der Erreger. Und zu guter Letzt werden wir in zehn Jahren wissen, welche Tierarten Naturkatastrophen vorhersagen können. Erste wissenschaftliche Daten von Erdbeben und Vulkanausbrüchen legen nahe, dass verschiedene Tiere solche Ereignisse Stunden vorher spüren. Wenn wir diese Fähigkeiten hieb- und stichfest belegen könnten, würde dies in Zukunft Hunderttausenden Menschen das Leben retten.

Wenn Sie Ihren Blick in die Zukunft richten – wie wird Icarus in zehn Jahren aussehen?

Zunächst einmal wird die Zahl an Forschungsprojekten, die Icarus nutzen, in den nächsten Jahren stark ansteigen. Ich



Martin Wikelski

könnte mir vorstellen, dass es im Jahr 2028 mehrere Tausend Projekte sein werden, die dank des Systems wissenschaftliche Daten gewinnen können. Hunderttausende von Tieren könnten mit unseren dann noch viel kleineren Sendern ausgestattet sein. In zehn Jahren wird Icarus zudem vermutlich nicht nur auf der ISS, sondern auch auf mehreren Satelliten stationiert sein. Damit ließen sich auch die Gebiete erfassen, die Icarus im Moment nicht abdecken kann. Mit zusätzlichen Satelliten können wir vor allem die wissenschaftlich besonders interessanten Regionen über dem 55. Breitengrad in Europa, Asien und Nordamerika erschließen.

Sobald Icarus in der Luft ist, wird sich ja auch für Sie persönlich manches ändern. Wie wird Ihr Arbeitsalltag dann aussehen?

Ich werde mich, Gott sei Dank, wieder mehr mit meinen eigenen Forschungsprojekten befassen können. In den vergangenen Jahren musste meine wissenschaftliche Arbeit leider manchmal zugunsten von Icarus zurückstecken. Das soll nun wieder anders werden. Ab Juli werde ich ein Sabbatical für die Wissenschaft nehmen und mich wieder ganz auf die Forschung konzentrieren. Interview: Harald Rösch

Rostschutz aus der Nanokapsel

Technologie, die Materialien lange vor Korrosion schützt, kommt in die Anwendung



Wirksam gegen Korrosion: Eine umweltverträgliche Kunststoffschicht, die sich selbst heilen kann, soll Bauteile aus Eisen dauerhaft vor Rost schützen.

Korrosion verursacht jährlich Kosten von rund 3,3 Billionen US-Dollar. Zur Vermeidung dieser Schäden werden bisher Lacke, Email, Gummi oder metallische Deckschichten auf den Werkstoff aufgebracht, die oftmals gesundheitsschädliche Chemikalien enthalten und keinen langfristigen Schutz bieten. Die Firma Enviral hat nun die Lizenz auf eine ganz neue Korrosionsschutztechnologie erworben, die am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung entwickelt wurde und auf sogenannten Smart Pigments beruht. Das Verfahren versetzt Korrosionsschutzbeschichtungen in die Lage, ähnlich wie beim Selbstheilungsmechanismus der menschlichen Haut, Beschädigungen selbstständig auszubessern. Dazu werden winzige Mikro- und Nanobehälter mit organischen Korrosionsschutzmitteln befüllt, mit einer Polyelektrolytschicht verkapselt und anschließend in die Beschichtung eingebettet. Kommt es zu einer Beschädigung der Schutzschicht – etwa durch Kratzer oder Risse –, werden an der Defektstelle die eingebetteten Behälter geöffnet und das Korrosionsschutzmittel freigesetzt. Dadurch wird die verletzte Stelle sofort wieder geschützt. Die Firma Enviral plant, die Smart Pigments weiterzuentwickeln sowie deren Produktion und Vermarktung voranzutreiben.

Möglicher Tuberkuloseimpfstoff vor letzter Hürde

Vielversprechendes Vakzin wird an Patienten mit wieder auftretender Tuberkulose getestet

Tuberkulose ist noch immer eine der gefährlichsten Infektionskrankheiten weltweit. Besonders die zunehmende Zahl multiresistenter Erreger macht Medizinern und Gesundheitspolitikern Sorgen. Ein möglicher neuer Impfstoff, dessen wissenschaftliche Grundlagen am Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie gelegt wurden, kommt nun in die entscheidende dritte Phase der Arzneimittelprüfung. Das Vakzin mit dem Namen VPM1002 wird seit Anfang dieses Jahres bis Mitte 2020 in einer Studie an rund 2000 Probanden in Indien getestet. Die Forscher untersuchen den potenziellen Impfstoff an Patienten, die bereits einmal an Tuberkulose erkrankt sind und erfolgreich behandelt wurden. Rund zehn Prozent dieser Pa-

tienten erkranken aus bisher unbekanntem Gründen innerhalb eines Jahres erneut. In der Prüfung wird nun ein Teil der Probanden, wenige Wochen nachdem sie als geheilt entlassen wurden, mit VPM1002 geimpft. „Wenn der Impfstoffkandidat die Wiederansteckung in dieser besonders schwierigen Gruppe senken kann und sich als gut verträglich erweist, hat er eine entscheidende Hürde auf dem Weg zur Zulassung genommen“, erklärt Stefan Kaufmann vom Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie, der das wissenschaftliche Konzept für VPM1002 maßgeblich entwickelt hat.

Immunsystem in Aktion: Ein weißes Blutkörperchen (rot dargestellt) zieht Tuberkulosebakterien (gelb) ins Innere, um sie dort einzuschließen. Allerdings können die Bakterien in den Fresszellen jahrelang überleben.



Fundament für Heidelberger Forschungsnetzwerk

Max-Planck-Gesellschaft und Baden-Württemberg vereinbaren Neubau für das Gemeinschaftsprojekt „Biologie auf der Nanoskala“

Mit einem neuen Gebäude wird das baden-württembergische Wissenschaftsministerium die Zusammenarbeit zwischen der Ruprecht-Karls-Universität und dem Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg unterstützen. Eine entsprechende Absichtserklärung unterzeichneten Anfang März Wissenschaftsministerin Theresia Bauer und Max-Planck-Präsident Martin Stratmann sowie der Rektor der Universität Heidelberg, Bernhard Eitel. Darin enthalten ist die Zusage des Landes, den Bau mit 25 Millionen Euro zu fördern. Das neue Gebäude soll als Teil des lebenswissenschaftlichen Innovationscampus „Heidelberg 4 Life“ in unmittelbarer Nachbarschaft zum Max-Planck-Institut errichtet werden. Dort soll das geplante Forschungsnetzwerk „Biologie auf der Nanoskala“ einziehen, das auf eine Initiative von Nobelpreisträger Stefan Hell zurückgeht. Mit dem Forschungsnetzwerk wollen Universität und Max-Planck-Institut ihre Zusammenarbeit in der biowissenschaftlichen und biomedizinischen Grundlagenforschung weiter ausbauen. Dazu sollen auch weitere Partner wie das Deutsche Krebsforschungszentrum und die klinische Forschung vor Ort mit eingebunden werden. Die Wissenschaftler wollen zudem Kontakte zur Industrie aufbauen, um ihre Erkenntnisse schnell in die medizinische Anwendung zu bringen.



Innovationen vor Augen: Bernd Bukau und Bernhard Eitel von der Universität Heidelberg, Baden-Württembergs Wissenschaftsministerin Theresia Bauer, Martin Stratmann und Stefan Hell von der Max-Planck-Gesellschaft (von links) nach der Vertragsunterzeichnung.

Ins Netz gegangen



Flucht und Trauma

20 bis 30 Prozent der Flüchtlinge leiden unter einer schweren Depression oder einer ausgeprägten posttraumatischen Belastungsstörung. Ein Kurzfilm des Max-Planck-Instituts für Psychiatrie zeigt mithilfe animierter Bilder, dass Schlafstörungen, Grübeln oder auch körperliche Beschwerden wie Kopfschmerzen oder Atemnot Symptome einer psychischen Erkrankung sein können. Der Film soll Betroffene entlasten und ermutigen, sich Hilfe zu suchen. Den zwei Minuten langen Film gibt es in sieben Sprachen: Deutsch, Englisch, Französisch, Italienisch, Arabisch, Dari und Kurdisch.

<http://bit.ly/2FDTj14>

Wissenschaft aus Leidenschaft

Unter diesem Motto stehen die Max Planck Schools – neuartige nationale Netzwerke für exzellente Graduiertenausbildung. Die Vorbereitungen für den Start der ersten drei Schools laufen auf Hochtouren. Von Herbst 2018 an werden die Max Planck Schools in die Ausschreibung gehen. Die ersten Studierenden können 2019 beginnen, offen ist das Angebot auch für Bachelorabsolventen, die zwei Jahre lang ein Masterstudium absolvieren und daran anschließend in drei Jahren ihren PhD abschließen können. Die gemeinsame Webseite, auf der sich Interessenten über das Programm informieren können, ist von Mai an online. <https://www.maxplanckschools.de>

Kopie und Original

Johann Anton Ramboux (1790 bis 1866) hat mit seinen Kopien italienischer Gemälde und Fresken die kunsthistorische Forschung nachhaltig geprägt. Generationen von Kunstforschenden und Kunstschaffenden verließen sich auf Ramboux' Kopienmuseum. Bevor die Fotografie die Dokumentation von Kunstwerken übernahm, waren seine Zeichnungen, Durchpausungen, Lithografien und Aquarelle oft die einzig verfügbaren Bildquellen. Das zur Max-Planck-Gesellschaft gehörende Kunsthistorische Institut Florenz stellt in einer Online-Ausstellung Ramboux' Kopien und die Originale gegenüber. <http://photothek.khi.fi.it/documents/oak/00000331>

Auf Fischzug im Weltraum

Luxemburg hat als erster europäischer Staat ein Gesetz erlassen, das Firmen Anspruch auf im Weltraum gewonnene Rohstoffe garantiert – wenn sie sich in dem kleinen Land niederlassen. Zusätzlich lockt das Großherzogtum mit Krediten und Forschungsinvestitionen. Das Kalkül dahinter: Luxemburg will zur weltweit wichtigsten Adresse für Bergbau im All werden in der Hoffnung, dass die beteiligten Unternehmen dann ihre Gewinne im Land versteuern. Doch die weitblickende Entscheidung ist in Hinblick auf das Völkerrecht mehr als zweifelhaft, wie unser Autor erläutert.

TEXT **LORENZO GRADONI**

Im Jahr 1973 machte der Präsident der Vereinigten Staaten von Amerika dem Großherzogtum Luxemburg ein ungewöhnliches Geschenk: eine luxemburgische Trikolore in der Größe eines Taschentuchs und dazu ein Stein, noch etwas kleiner als das Stoffstück. Die Flagge war gerade im Rahmen der *Apollo 17*-Mission zum Mond und zurück gereist, und der Stein stammte aus einem Mondtal

.....

Der Zusatz
„gemäß internationalem Recht“
wurde fallen gelassen

unweit des Mare Tranquillitatis. Der heute im Nationalmuseum für Naturgeschichte verwahrte Mondsplitter wurde Luxemburg „als Symbol für die Eintracht menschlichen Strebens“ überreicht.

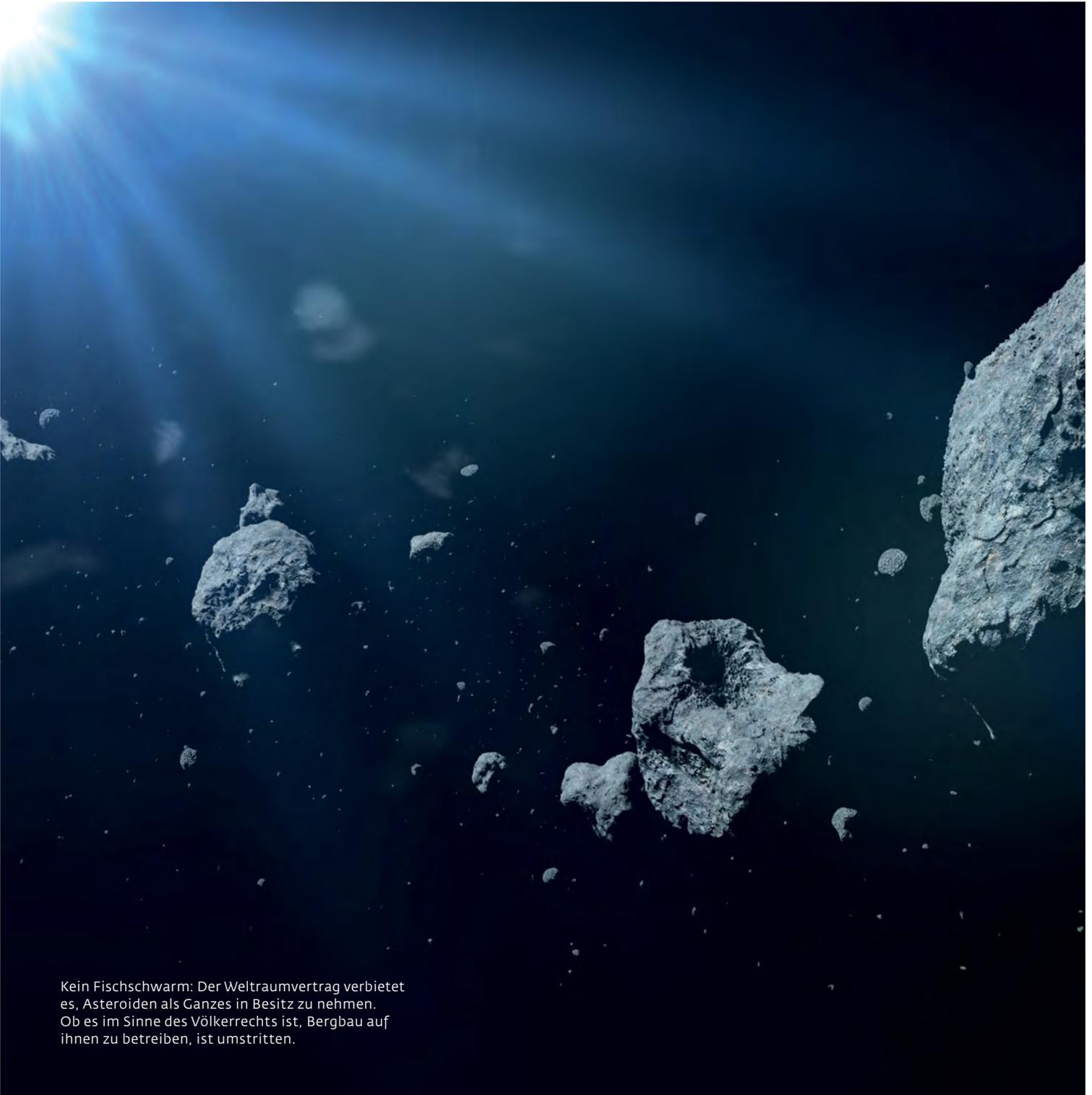
Heute kann man in Luxemburg das Eigentums- und Veräußerungsrecht an solchen Steinen innehaben – ganz gleich, ob diese vom Mond, von einem erdnahen Asteroiden oder einer Marslagerstätte stammen. Bedingung ist, dass sie von einer Gesellschaft luxemburgischen Rechts abgebaut werden, die „für die Mission eine schriftliche Genehmigung“ beim zu-

ständigen Minister eingeholt hat. Geregelt ist das in einem Gesetz vom 20. Juli 2017, das in Artikel 1 festlegt: „Die Ressourcen des Weltraums können in Besitz genommen werden.“

Das wird all diejenigen überraschen, die glaubten, im Sinne des Völkerrechts sei der Weltraum der gesamten Menschheit vorbehalten. Wieso kann es zulässig sein, dass jemand die dortigen Ressourcen besitzt und zu seinem Vorteil nutzt? Was tun dann die anderen Staaten – wenn man von den USA absieht, die 2015 ein ähnliches Gesetz verabschiedet haben, sowie von den Vereinigten Arabischen Emiraten, wo ein vergleichbares Gesetz in Vorbereitung ist?

Nehmen wir an, ein Unternehmen ist nach luxemburgischem Recht Eigentümer einer Tonne Schwermetalle, die von einem Asteroiden gewonnen wurden. Läuft es dann nicht Gefahr, dass sein wertvoller Besitz im Hafen von Antwerpen beschlagnahmt wird? Tatsächlich hat sich Belgien als Mitglied im Ausschuss der Vereinten Nationen für die friedliche Nutzung des Weltraums klar dagegen ausgesprochen, dass die Privatisierung von Weltraumressourcen einseitig gefördert wird. Um diesem „außerirdischen“ Streit beizuwohnen, braucht man daher nur in die Beneluxländer zu schauen – oder in die luxemburgische Hauptstadt.

Am 15. November 2016 brachte der stellvertretende luxemburgische Ministerpräsident Etienne



Kein Fischschwarm: Der Weltraumvertrag verbietet es, Asteroiden als Ganzes in Besitz zu nehmen. Ob es im Sinne des Völkerrechts ist, Bergbau auf ihnen zu betreiben, ist umstritten.

Schneider in der Abgeordnetenversammlung einen Gesetzentwurf ein, dessen erster Artikel lautete: „Die Ressourcen des Weltraums können gemäß internationalem Recht in Besitz genommen werden.“ Sicher wird der Leser den Unterschied zwischen diesem vorläufigen Wortlaut und der oben zitierten Endfassung des Gesetzes bemerken. In der verabschiedeten Fassung fehlt der Verweis auf das Völkerrecht, so als wolle man diesen Punkt schamhaft verschweigen. Doch das scheint nur so: Die luxemburgische Regierung ist nach wie vor der Überzeugung, dass das internationale Recht ihrem „Space Resources“-Projekt nicht im Wege steht. Warum dann also diese Streichung, die man als Schuldeingeständnis deuten könnte?

Der Staatsrat, der für die Streichung – wie wir sehen werden: unbeabsichtigt – verantwortlich ist, hat seinen Sitz nur einige Hundert Meter vom Abgeordnetenhaus entfernt. Seine Aufgabe ist zu prüfen, ob Gesetzesentwürfe mit der luxemburgischen Verfassung vereinbar sind und ob sie internationale Abkommen und EU-Recht respektieren. Die Auffassung des Staatsrats zu dem Gesetz ist spitzfindig: Obwohl

„ist zu streichen.“ Und doch wollte der Staatsrat den Entwurf nicht gänzlich kippen. Vielmehr lautete seine Botschaft an die Abgeordnetenversammlung:

Ein Gesetz, das besagt, dass das Völkerrecht die Aneignung von Weltraumressourcen generell toleriert, ist zwar nicht umsetzbar, weil irreführend. Aber der Gesetzgeber kann dennoch ein Genehmigungsverfahren einführen, das es dem zuständigen Minister ermöglicht, von Fall zu Fall unter Berücksichtigung der jeweiligen Umstände und des einschlägigen Völkerrechts über einen „Passierschein“ für den Weltraum zu entscheiden.

Wie bereits dargestellt, kam die Botschaft aber nur zur Hälfte an: Artikel 1 des Gesetzentwurfs blieb stehen, wenn auch ohne jeglichen Bezug auf das Völkerrecht, so als ob das die luxemburgische Rechtsordnung und die Investoren, die man mit Artikel 1 zu gewinnen hofft, vor der vom Staatsrat aufgezeigten rechtlichen Unklarheit schützen könnte.

Wenn das Völkerrecht vage ist, woher kommt dann aber die Gewissheit der Befürworter des Gesetzes? Es ist vielleicht kein Zufall, dass sich der Kommentar zum Gesetzentwurf in seiner Begründung vor allem auf luxemburgisches Landesrecht stützt und im Übrigen naturrechtliche Argumente vorbringt. Danach sei der Weg zur Aneignung von Weltraumressourcen bereits durch den Code Napoléon geebnet worden: Dessen Geltungsbereich wird einfach analog zu „vergleichbaren Rechtslagen“ erweitert.

Laut den Autoren des Gesetzentwurfs ist es vor allem „die Analogie zwischen Weltraum und Meer“, die „rechtlich [...] offensichtlich“ ist. Fragt sich nur, auf welches Recht man sich hier berufen kann. Wohl weniger auf das Völkerrecht als vielmehr auf das Naturrecht, wie es François Laurent definiert hat, ein berühmter, 1810 in Luxemburg geborener Jurist, der die 33 Bände umfassenden „Grundsätze des bürgerlichen Rechts“ (*Principes de droit civil*) verfasste sowie das 18-bändige Monumentalwerk *Untersuchungen zur Geschichte der Menschheit* (*Études sur l'histoire de l'humanité*). Laurent zufolge, der die „Natur der Dinge“ gut kannte, lässt sich von herrenlosen Sachen, wie Schalentieren und Fischen, nicht behaupten, dass sie „von der Natur für den Gebrauch durch die ganze Menschheit bestimmt sind; in Wirklichkeit dienen sie niemandem, solange sie keinen Besitzer haben; und sobald sie einen Besitzer haben, dienen sie ausschließlich demjenigen, der sie sich angeeignet hat.“

Sind Asteroiden wie kleine Inseln, wie Findlinge oder wie Eisberge?

er in seiner Stellungnahme vom 7. April 2017 keine signifikante Diskrepanz zwischen Gesetzentwurf und Völkerrecht fand, stellte er die Daseinsberechtigung des Projekts an sich infrage.

Dabei konnte der Staatsrat sein Unbehagen im Hinblick auf das internationale Weltraumrecht nicht verhehlen – ein Recht, das er für schwammig hält. Die Regierung des Großherzogtums hatte jedoch erklärt, der „primäre Zweck“ des Gesetzentwurfs bestehe darin, „Rechtssicherheit in Bezug auf den Besitz von Mineralien und anderen wertvollen Ressourcen zu schaffen, die im Weltraum und insbesondere auf Asteroiden gewonnen werden“.

Nun kann das luxemburgische Recht allein diese Rechtssicherheit nicht entfalten, wenn das Völkerrecht keinen verlässlichen Rahmen dafür bietet. Die praktische Konsequenz, die der Staatsrat daraus zieht, ist radikal: „Artikel 1 des Gesetzentwurfs“ – er steht gewissermaßen symbolisch für das gesamte Projekt –



Nach Auffassung der luxemburgischen Regierung sind die Ressourcen des Weltraums also „wie Fische und Schalentiere“ aneignungsfähig, „aber Himmelskörper und Asteroiden sind es nicht, ebenso wenig wie das Meer“. Gemäß Artikel 116 des Seerechtsübereinkommens der Vereinten Nationen hat „jeder Staat das Recht, dass seine Staatsangehörigen Fischerei auf hoher See ausüben können“. Dieselbe Regel würde analog auch für die Fischer auf der ganz hohen See, nämlich im Weltraum, gelten. Voraussetzung wäre, dass sie im schwarzen Nichts zwischen einem Fischgrund und einer Insel unterscheiden können, da andernfalls die Gefahr besteht, dass sie gesetzeswidrig fischen.

Wer seine Netze gern nach einem Asteroiden auswerfen würde, dem sagt die luxemburgische Regierung also, dass so ein Himmelskörper – selbst wenn er entsprechend klein ist – leider nicht einem Thunfisch entspricht. Welchen Platz würde demnach die bunt zusammengewürfelte Familie der Asteroiden in diesem analogen Schema von Meer und Weltraum einnehmen? Sollen wir sie als unbewohnte kleine Inseln betrachten oder eher als Unterwasserfindlinge oder als Kieselsteine, die das Meer an den Strand spült? Sind sie vielleicht mit Eisbergen vergleichbar? Lassen sie sich aus ihren Umlaufbahnen drängen oder kann man auf ihnen so lange schürfen, bis sie nur noch leere Hüllen sind, ohne dass dies als rechtswidrige Aneignung gilt? Aber vor allem: Ist man wirklich sicher, dass François Laurent sie nicht als große Fische betrachtet hätte? „New Space“-Investoren würde das freuen, aber was sagt das Völkerrecht? Nichts, was von Belang wäre, behaupten die Autoren des Gesetzentwurfs.

Zweifellos gibt es eine breite Debatte zu diesem Thema, wobei „die vorherrschende Lehrmeinung noch immer lautet, dass es möglich ist, sich diese Ressourcen anzueignen“ – so der Kommentar des luxemburgischen Parlaments. Die Idee, das Weltraumrecht von der Warte des Seerechts zu betrachten, ist sicherlich nicht willkürlich, hat doch dieses Juristen in ihren Überlegungen oft als Vorbild gedient. Sie ist aber bei Weitem nicht das allein seligmachende Konzept, mit dem sich der rechtliche Status jeder Kuriosität im Weltall klären ließe: Die Schwierigkeiten, auf die man stößt, wenn man versucht, das maritime Äquivalent zu einem Asteroiden zu definieren, zeigen das deutlich. Man muss auch bedenken, dass der Eckpfeiler des Weltraumrechts, das heißt das Verbot hoheitlicher Gewalt, nicht auf Grundlage, sondern entgegen der Analogie zwischen Meer und Weltraum gesetzt wurde.

„Der Weltraum ist für die Erde wie das Meer für die Kontinente“, schrieb 1989 René-Jean Dupuy, ein renommierter französischer Völkerrechtler. Aber wenn Himmelskörper wie Kontinente oder Inseln wären, könnten die Staaten sie genauso einnehmen, wie sie es taten, als ihre Schiffe auf der Suche nach unbekanntem Land über die Ozeane segelten. „Ein Planet

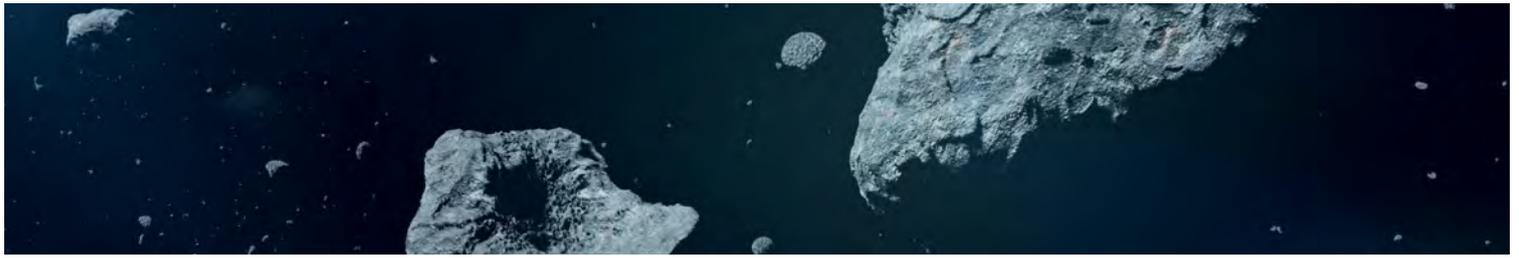
Nur 18 Staaten erkennen den Mond als gemeinsames Erbe der Menschheit an

wird zu einem außerirdischen Besitz des Staates, der ihn sich durch Eroberung oder friedliche Besetzung angeeignet hat“, schrieb Joseph Kroell noch 1953 in einer Fachzeitschrift zum Weltraumrecht.

Die internationale Gemeinschaft hat jedoch in der ersten Hälfte der 1960er-Jahre anders darüber entschieden. Es war das Jahrzehnt, in dem die internationale Gemeinschaft begann, das Weltraumrecht zu schaffen – ein freiwilliges Recht, das sich bisweilen gegen die „Natur der Dinge“ entwickeln konnte. Es unterstützte zudem die Forderung nach Gerechtigkeit aus den Nationen, die sich damals von der Kolonialherrschaft befreien – wenn auch vor allem symbolisch und für begrenzte Zeit. Was legt dieses Recht für den juristischen Status der Weltraumressourcen fest?

Den Zugang zum Rechtsgebiet des Weltraumrechts findet man über fünf maßgebliche Verträge, die zwischen 1967 und 1979 unter der Schirmherrschaft der Vereinten Nationen geschlossen wurden. Der erste dieser Verträge, der einfach nur Weltraumvertrag genannt wird, ist seit 1967 in Kraft. Er zählt heute 107 Unterzeichnerstaaten, darunter Luxemburg sowie sämtliche Weltraumnationen. Der 1984 in Kraft getretene Vertrag über die Aktivitäten der Staaten auf dem Mond und anderen Himmelskörpern, der sogenannte Mondvertrag, wurde hingegen nur von 18 Ländern ratifiziert, darunter keine der Weltraumnationen. Er ist damit de facto gescheitert.

Wie lassen sich diese höchst ungleichen Ergebnisse erklären? Die beiden Verträge widersprechen einander nicht, aber der zweite geht weiter, da er ein gemeinsames Vorgehen bei der Nutzung der Weltraumressourcen befürwortet und prinzipiell den In-



teressen der Entwicklungsländer entspricht. Das hat sein Schicksal mit dem Beginn der konservativen Revolution in den 1980er-Jahren besiegelt. Der Mondvertrag erklärt nicht nur „den Mond und seine natürlichen Ressourcen“ zum „gemeinsamen Erbe der Menschheit“ (was auch für andere Himmelskörper des Sonnensystems, außer der Erde gilt). Er verpflichtet auch die kleine Gruppe seiner Unterzeichnerstaaten, „eine internationale Regelung einschließlich geeigneter Verfahren“ für die Ausbeutung der Weltraumressourcen zu schaffen, sobald „deren Machbarkeit absehbar wird“. Die Gründe, warum dieser Absatz Makulatur geblieben ist, sind eher politischer als technischer Natur.

Wie umstritten die Idee war, internationale Behörden zur Verwaltung des „gemeinsamen Erbes der Menschheit“ zu schaffen, zeigten damals – in diesem Fall für die Tiefsee – die Diskussionen auf der Dritten Seerechtskonferenz der Vereinten Nationen. Die Verhandlungen endeten 1982 in einer Atmosphäre dumpfer Feindseligkeit zwischen den beiden Lagern: auf der einen Seite die wohlhabenden Länder, die bereit waren, in die Erschließung der ebenso reichen wie

schen Gesetzes messen lassen. Allerdings sagt diese Bestimmung, die unzählige Male und oft widersprüchlich ausgelegt wurde, nicht viel über die Frage aus, ob Weltraumressourcen in Besitz genommen werden können oder nicht. So kann man argumentieren, dass der Begriff „nationale Aneignung“ gewählt wurde, um auch nichtstaatliche Akteure in das Verbot einzubeziehen. Das würde dann zum Beispiel für ein Unternehmen gelten, das in einem Vertragsstaat ansässig ist und eine Mondparzelle in Besitz nehmen möchte.

Man könnte aber auch behaupten, dass sich die Formulierung schlicht und einfach nur auf Staaten bezieht und zusätzlich vielleicht auf neue Staaten, die künftige Siedler im Weltraum gründen könnten, oder auf die indirekte Expansion staatlicher Hoheitsrechte, zum Beispiel durch die Besetzung von Gebieten mithilfe von Handelskompanien nach dem Modell früherer Zeiten. Mit Sicherheit lässt sich nur sagen, dass die Verfasser vor allem darauf bedacht waren, jegliche Ausweitung der Hoheitsgewalt auf den Weltraum zu untersagen, und dass die von ihnen gewählte „Sperrformel“ („durch andere Mittel“) just darauf abzielte, die Umgehung dieses Verbots zu verhindern.

Dennoch hat das Verbot hoheitlicher Gewalt auch Folgen, wenn es um Eigentumsrechte an Weltraumressourcen geht. Denn der Erwerb und die Sicherung von Eigentum hängen davon ab, dass ein Staat hoheitliche Gewalt ausübt. Um sich im Weltraum festzusetzen, müsste sich das Eigentum also zunächst von der Hoheitsgewalt lösen. Doch diese scheint ihm wie ein Schatten zu folgen, was beruhigend und bedrohlich zugleich ist. Nach Artikel VI des Weltraumvertrags, an den sich das luxemburgische Weltraumgesetz anlehnt, bedürfen Tätigkeiten privater Akteure im Weltraum „der Erlaubnis und fortgesetzten Überwachung durch den betreffenden Staat“. Wenn ein Staat jedoch diese Aufgabe erfüllt, besteht die Gefahr, dass er die Grenze zwischen der legitimen Ausübung von Kontrolle und einem impliziten Hoheitsanspruch überschreitet.

Bisher hat das Luxemburger Gesetz zu Weltraumressourcen in diplomatischen Kreisen kaum Beachtung gefunden. Die nächsten Sitzungen des UN-Komitees für die friedliche Nutzung des Weltraums werden wohl zeigen, wie die internationale Gemeinschaft zur privaten Aneignung von Weltraumressourcen steht. Wie viele Staaten – abgesehen von den USA und den

Auf ein ähnliches Gesetz der USA hat Russland empört reagiert

unzugänglichen Bodenschätze zu investieren, auf der anderen Seite die zahlenmäßig überlegenen Entwicklungsländer. Sie erzwangen schließlich die Annahme eines Vertragstexts, der die Schaffung einer mächtigen internationalen Tiefseebehörde vorsah, die im Namen der „ganzen Menschheit“ handeln sollte. Es war ein Pyrrhussieg: Das Übereinkommen trat erst zwölf Jahre später in Kraft, nach Verabschiedung eines Ergänzungsabkommens, das die Mechanismen zur Verteilung der Reichtümer erheblich schwächte.

Und was ist mit der Verwaltung des extraterrestrischen Erbes der Menschheit? Der Weltraumvertrag verfügt in Artikel II: „Der Weltraum einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper unterliegt keiner nationalen Aneignung durch Beanspruchung der Hoheitsgewalt, durch Benutzung oder Okkupation oder durch andere Mittel.“ Daran muss sich auch die internationale Rechtmäßigkeit des luxemburgi-

Vereinigten Arabischen Emiraten – den Standpunkt Luxemburgs teilen, ist schwer abzuschätzen.

Höchstwahrscheinlich wird das Thema umstritten sein, wie schon Russlands empörte Reaktion auf das entsprechende US-Gesetz gezeigt hat. Nach Russlands Ansicht war die Initiative der USA eine „willkürliche Selbsterweiterung der eigenen ‚Freiheit‘“ und das Ergebnis der „berüchtigten Doktrin der Vorherrschaft im Weltraum“. In den Augen einer führenden Raumfahrtnation agiert Luxemburg also im Schatten eines selbst ernannten Hegemons, der die Tatsache ignoriert, dass Bergbau im Weltraum – besonders, wenn dabei kleine Asteroiden aus ihren Bahnen gelenkt werden – „in manchen Fällen für die gesamte Weltbevölkerung ein hohes Risiko darstellt und deswegen auf internationaler Ebene geregelt werden sollte“.

Innerhalb der EU wird das Thema derzeit nicht diskutiert. Klar ist jedoch, dass die wenigen EU-Staaten, die durch den Mondvertrag gebunden sind (Österreich, Belgien und die Niederlande), sich nicht hinter Luxemburg stellen können, ohne ihre internationalen Verpflichtungen zu verletzen. Gerade Belgien hat sich deutlich gegen nationale Alleingänge in diesem Bereich ausgesprochen. Stattdessen befürwortet das Land neue internationale Regelungen, um aus der Sackgasse zu kommen, in welche die internationale Gemeinschaft durch die Mehrdeutigkeit des Weltraumvertrags und das Scheitern des Mondvertrags geraten ist. Die Tatsache, dass zwei Staaten (Armenien und Venezuela) in jüngerer Zeit den seit Langem vernachlässigten Mondvertrag ratifiziert haben, lässt sich als Signal werten, dass einseitige Initiativen wie die der USA und Luxemburgs zunehmend kritisch gesehen werden. Das macht es unwahrscheinlich, dass weitere Staaten dem Vorbild folgen werden.

Andrew G. Haley, einer der Pioniere des Weltraumrechts, hatte 1963 prophezeit: „Eines Tages wird die Industrie Meteoritenerz abbauen wollen, und dann werden sich sämtliche alten Rechtsprobleme unter wesentlich komplizierteren Umständen von Neuem stellen.“ Das luxemburgische Weltraumgesetz wäre ein guter Anlass, sich wieder mit diesem Thema zu befassen und eine neue Vision für ein internationales Weltraumrecht zu entwerfen. ◀

Eine ausführliche Version des Textes erschien auf Französisch in der luxemburgischen Zeitschrift FORUM, Dezember 2017 (www.forum.lu).



DER AUTOR

Lorenzo Gradoni ist Senior Research Fellow am Max Planck Institute for International, European and Regulatory Procedural Law in Luxemburg. Als Politologe und Jurist befasst er sich mit Recht und Politik im internationalen Kontext, insbesondere mit Rechtstheorie, systemübergreifenden Rechtsnormen und strafrechtlichen Fragen sowie mit Regelungen der Welthandelsorganisation WTO. Nach seiner Promotion in EU-Recht war er unter anderem als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Graduate Institute of International and Development Studies in Genf tätig, später als außerordentlicher Professor an der Universität von Bologna und als Gastprofessor an der Universität Panthéon-Sorbonne in Paris.



Die Sehnsucht nach Rosen

Max-Planck-Wissenschaftler kooperieren mit Partnern in mehr als 110 Ländern dieser Erde. Hier schreiben sie über persönliche Erlebnisse und Eindrücke. Lale Yalçın-Heckmann, Mitarbeiterin am Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung in Halle, untersucht am Beispiel des traditionellen Rosenanbaus in der Türkei Werte und moralische Ideen rund um wirtschaftliche Handlungen.

Die Rosen und ich – diese Geschichte geht ganz weit zurück. Als ich klein war, erzählte mir meine Großmutter mütterlicherseits Märchen von Frauen in den traditionellen Badehäusern, den Hamams, die sich mit Bädern aus Rosenblüten verwöhnten. In der frühen osmanischen Zeit kamen die Rosen, aus denen das duftende Öl gewonnen wurde, aus dem Mittleren Osten und verbreiteten sich von dort aus zum Balkan – und auch nach Bulgarien, wo die türkischen Siedler sie kultivierten.

Wegen meiner familiären Wurzeln sowohl in Bulgarien als auch im türkischen Isparta ist es also keine Überraschung, dass Rosen und besonders die Kultur rund um den Rosenanbau und die Rosenölproduktion mich seit jeher faszinieren. Es gibt einen Ausdruck im Türkischen, der dieses Gefühl beschreibt und sich frei mit „Sehnsucht des Herzens“ übersetzen lässt. Die Sehnsucht meines Herzens nach Kultur und nach Rosen ergibt vollkommenen Sinn für die Menschen in der Türkei, mit denen ich spreche. Besonders in der Region Isparta, wo mein Vater herkommt.

In meinem aktuellen Forschungsprojekt widme ich mich den Werten und moralischen Ideen rund um wirtschaftliche Handlungen – am Beispiel, wie traditioneller Rosenanbau und moderne Produktionsprozesse in der Türkei die regionale Gemeinschaft und ihre Werte prägen. In Isparta, dem traditionellen Knotenpunkt des Rosenanbaus und der Rosenölproduktion, verbringe ich Wochen und Monate: Ich pflücke Rosen und spreche mit den Bauern, den Rosenölproduzenten und den Saisonarbeitern. Letztendlich hängt die sozialanthropologische Forschung stark von den Beziehungen vor Ort ab. Und somit muss man sich mit den Menschen anfreunden, um auf den Grund ihres Wissens über die wirtschaftliche Situation zu gelangen.



Lale Yalçın-Heckmann, 62, studierte Soziologie an der Boğaziçi-Universität in Istanbul, bevor sie 1986 ihren Doktorgrad in Sozialanthropologie an der London School of Economics erhielt. Nachdem sie 1988 in die Bundesrepublik kam, forschte sie über türkische und kurdische Migranten sowie den Islam in Deutschland und Frankreich. Sie habilitierte sich im Jahr 2009 und leitete eine Gruppe am Max-Planck-Institut für ethnologische Forschung. Seit 2010 lehrt sie an der Universität von Pardubice, Tschechien, und ist Fakultätsmitglied der International Max Planck Research School ANARCHIE. Im ERC-Projekt *Realising Eurasia: Civilisation and Moral Economy in the 21st Century* koordiniert sie vorrangig die wissenschaftlichen Aktivitäten sowie ihre eigene Forschung im türkischen Isparta.

Mit den Einwohnern Zeit zu verbringen, kann jedoch mitunter anstrengend sein. Da Rosen sehr anfällig sind und ihr Duft schnell verfliegt, beginnt die Ernte um fünf Uhr morgens – mit dem großen Vorteil, dass die Arbeit normalerweise vor der Mittagshitze getan ist. Ob ein Rosenpflücker fair behandelt wird, hängt dabei sehr davon ab, wie sein Verhältnis zum Bauern ist und wie viele Saisonkräfte der Bauer während der Rosenernte zur Verfügung hat. Am Ende des Arbeitstages wird registriert, wie viel jede Arbeiterin und jeder Arbeiter gepflückt haben. Die Bezahlung erfolgt am Ende der Erntesaison. Eine starke Arbeitskraft kann bis zu 40 Kilogramm täglich pflücken, was im Jahr 2016 umgerechnet einen Lohn von 14 Euro ergab. Mein persönlicher Rekord waren übrigens 10 Kilogramm.

In Gesprächen und Diskussionen habe ich erfahren, dass der Rosenanbau – obwohl durch Expertenwissen und jahrelange Erfahrung geprägt – keinesfalls die einzige Einnahmequelle der Bauern ist. In der Tat ist ein Mischanbau mit Äpfeln, Kirschen oder auch Milchwirtschaft die Voraussetzung dafür, dass die Bauern die notwendigen Hebel in der Hand haben, um mit den Rosenölfabriken die Preise zu verhandeln.

In den vergangenen Jahren waren die Rosenpreise stark gestiegen, und vor Kurzem sind die Rosenölpreise abgestürzt. Somit ist es im Interesse der Bauern zu argumentieren, dass sie auch kurzerhand auf ein anderes Produkt setzen könnten. Ob nun ein Obstbaum oder ein Rosenstock behalten wird, hängt vom Marktwert ab. Da Bauern ihre Anbaustrategie meist flexibel gestalten können und die Fabriken ihre wahren Rosenölmengen nicht bekannt geben, ergibt sich eine völlig undurchsichtige Preisgestaltung.

Wie in vielen ländlichen Gesellschaften ist der Nachwuchs rar – die Familien ziehen in die großen Städte, und die Rosenernte erfolgt innerhalb von nur zwei Monaten im Jahr. Arbeiter für diese Zeit zu organisieren, hängt somit stark von Freundschaften und verwandtschaftlichen Beziehungen ab. Einfach ausgedrückt, findet sich die gesamte türkische Familie und Verwandtschaft in der Erntezeit wieder in ihrem Heimatdorf bei ihren Angehörigen ein, um bei der Rosenernte zu helfen und das Überleben dieser alten Tradition zu sichern. Am Ende führt die Sehnsucht des Herzens zu den Rosen zurück.

Gene als Schmarotzer

Parasiten gibt es nicht nur im Pflanzen- und Tierreich, sie sind auch ein Teil von uns selbst. Unser Erbgut enthält Unmengen kleiner Abschnitte, die sich auf seine Kosten vervielfältigen. Diese sogenannten Transposons werden deshalb auch als parasitische DNA bezeichnet.

Oliver Weichenrieder vom **Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie** in Tübingen will den Kopiervorgang der Transposons genauer verstehen. Nicht nur weil sie Krankheiten auslösen können, sondern auch weil sie möglicherweise ein wichtiger Motor der Evolution sind.

TEXT **TIM SCHRÖDER**

Die Essenz seiner Forschungsarbeit ist winzig und glitzert wie feiner Diamantenstaub. Oliver Weichenrieder schiebt eine Plastikplatte mit kleinen Vertiefungen unter dem Mikroskop hin und her. Er sucht ein Weilchen. „Ah, da sind einige drinnen. Hübsch, nicht wahr?“ Die kleinen Kristalle sind mit bloßem Auge nicht sichtbar, unter dem Mikroskop aber glitzert es violett, rosa und blau. „Es gehört ein wenig Glück dazu, dass sich die Kristalle bilden. Deshalb verwenden wir diese Platten mit den vielen kleinen Vertiefungen“, sagt Weichenrieder. Das erhöht die Trefferquote.

Kristall, das klingt nach Materialforschung, nach Glas und Keramik. Doch darum dreht es sich bei Oliver

Weichenrieder nicht. Er ist Biochemiker, und bei den Kristallen, die er am Tübinger Max-Planck-Institut züchtet, handelt es sich um Moleküle aus lebenden Zellen, genauer um Proteine oder Ribonukleinsäuren (RNAs). Weichenrieder will mithilfe der Kristalle die Struktur dieser Moleküle aufklären, um damit eines der großen Geheimnisse der Genetik zu lösen: das Rätsel um parasitische DNA, also Erbgutabschnitte, die sich unabhängig vom übrigen Erbgut selbst vermehren.

Parasitische DNA ist die plakative Beschreibung für die Erbgutchnipsel, wissenschaftlich werden sie als Transposons bezeichnet. Transposons sind kurze DNA-Abschnitte, die sich von allein immer wieder kopieren und an neuen Stellen der DNA ins Erbgut einbauen. Den

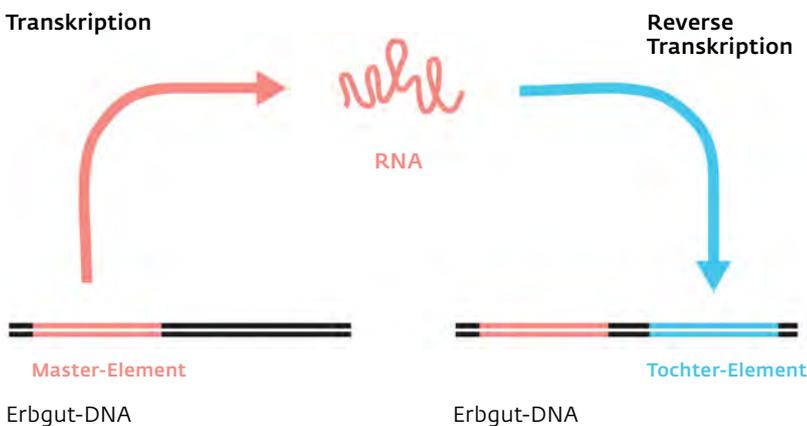
Begriff „transponieren“ kennt man aus der Musik. Er bedeutet, ein Musikstück in eine andere Tonart zu versetzen. Bei Transposons wird genetische Information vom einen zum anderen Ort des Erbguts verfrachtet. Dieses Ein- und Umlagern findet bei der Entwicklung von Geschlechtszellen statt, aber vor allem auch im frühen Embryo, wenn sich Zellen intensiv teilen.

SPRUNG INS GENOM

Dadurch wird die Abfolge der DNA jedes Mal aufgemischt – mit teils ernststen Folgen: „Es kann passieren, dass sich ein Transposon in einem Genabschnitt einnistet, der die Information für ein Protein enthält, das beispielsweise wichtig für den Stoffwechsel ist“, erklärt Weichen-



Die rund einen zehntel Millimeter großen Kristalle eines Transposon-Proteins. Durch die Analyse der Kristallstruktur haben Tübinger Forscher herausgefunden, wie das Protein die Transposon-RNA verpacken kann.



Oben Damit Retrotransposons Kopien ihrer selbst ins Erbgut einschleusen können, wird ihre DNA – das sogenannte Master-Element – zunächst in RNA umgeschrieben. Diese wird dann wieder in DNA zurückübersetzt (Reverse Transkription). Die so entstehende DNA-Kopie (Tochter-Element) wird dabei ins Genom integriert.

Rechts Oliver Weichenrieder kontrolliert Brutschränke für genetisch veränderte Bakterien. Die Mikroben produzieren Transposon-Proteine, die der Forscher und seine Kollegen zur Analyse der Proteinstruktur benötigen.

rieder. „Das Gen kann dann nicht mehr korrekt abgelesen werden.“ Das APC-Gen ist ein solcher Fall. Das Protein, das es kodiert, kann die Entstehung von Krebs verhindern. Ist es durch den Einbau eines Transposons gestört, kann Darmkrebs die Folge sein.

Das Erbgut benötigt Proteine, um die darin enthaltene Information von der DNA abzulesen, in RNA umzuschreiben und in neue Proteine zu übersetzen. Auch Transposons brauchen verschiedene Proteine für ihre Vervielfältigung und den Einbau der Kopie ins Erbgut. „Noch wissen wir nicht genau, wie die Transposons arbeiten“, sagt Weichenrieder. „Aber wenn wir die Struktur der Proteine aufklären,

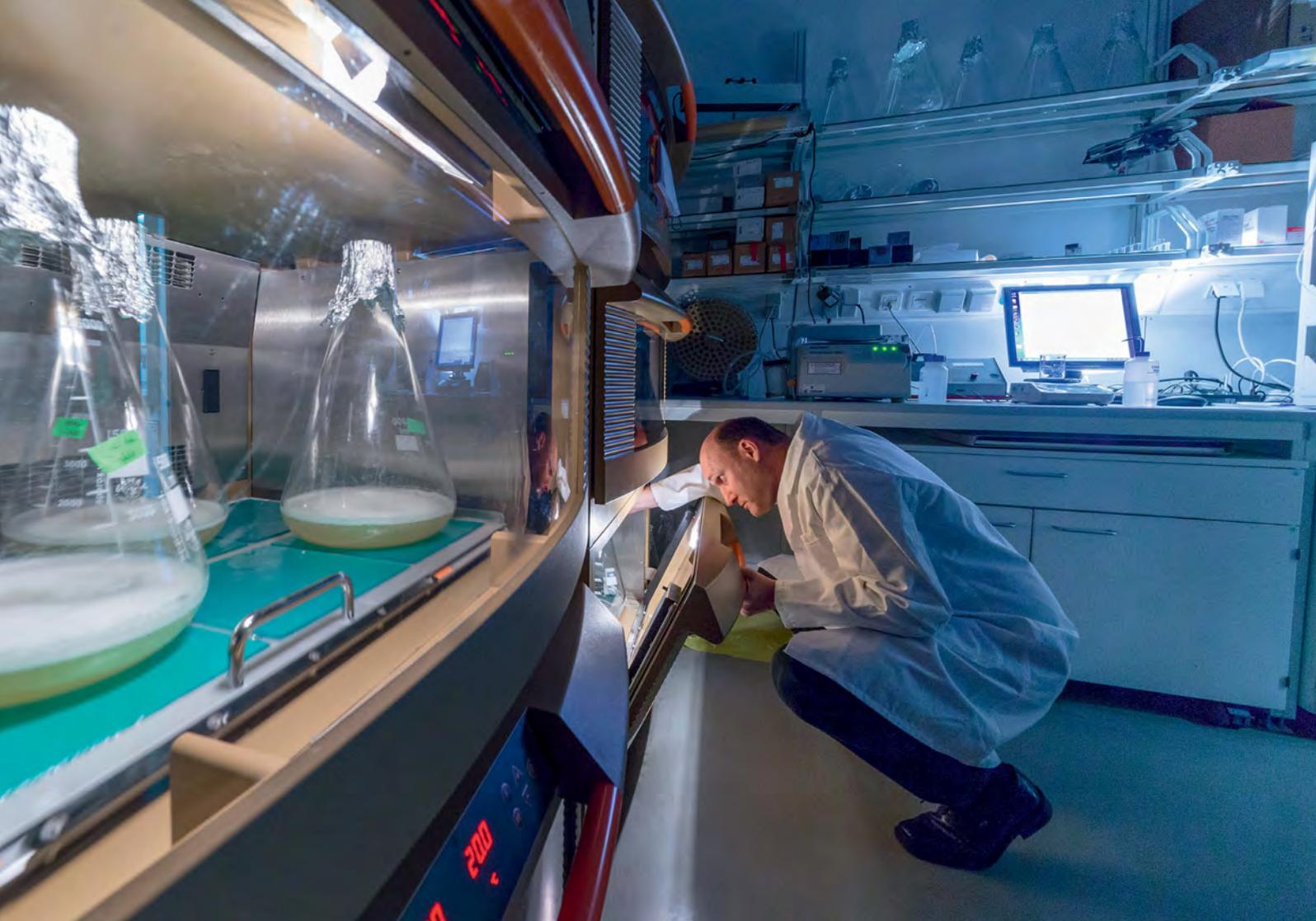
die an der Vervielfältigung der Transposons beteiligt sind, verstehen wir hoffentlich den ganzen Prozess.“

TRANSPOSON-FLUT IM ERBGUT

Oliver Weichenrieder und seine Kollegen haben sich vor allem der Struktur- aufklärung zweier wichtiger parasitärer DNA-Schnipsel verschrieben: des LINE-1- und des Alu-Retrotransposons, weil die beiden im Erbgut des Menschen extrem häufig vorkommen. Ein LINE-1-Abschnitt ist etwa 6000 DNA-Basenpaare lang – ungefähr so lang wie ein durchschnittliches Gen. Circa 500 000 Kopien und Fragmente gibt es im Erbgut. Damit macht das LINE-1-

Element allein schon 17 Prozent des Erbguts aus. „Diese ungeheure Zahl ist im Laufe der Evolution über Jahrtausende durch immer neue Kopien entstanden“, sagt Weichenrieder. Möglicherweise ist mehr als die Hälfte unseres Erbguts aus transponierbaren Elementen entstanden. Bei anderen Organismen kann der Anteil an Transposons noch höher sein: Bei Maispflanzen zum Beispiel gehen sogar 85 Prozent des gesamten Genoms auf Transposons zurück.

Freilich konnten diese Transpositionen nur dann weitervererbt werden, wenn sie das Individuum nicht töteten, etwa durch Krebs. „Nicht jede Transposition muss für den Betroffenen oder



dessen Nachkommen tödlich sein. Es kommt darauf an, in welchem Teil des Erbguts die LINE-1-Kopie eingebaut wird.“ Darüber hinaus werden viele im Laufe der Zeit durch Mutationen deaktiviert. So sind gegenwärtig nur etwa 100 der 500 000 LINE-1-Abschnitte im menschlichen Erbgut aktiv, also zu parasitärem Verhalten fähig, die übrigen funktionieren nicht mehr.

Besonders faszinierend sind für Weichenrieder die Alu-Retrotransposons, die ebenfalls über das ganze Genom verteilt sind. Nicht nur, weil auch sie mit mehr als einer Million Kopien in ungeheurer großer Zahl vorkommen und etwa zehn Prozent des Erbguts ausmachen, sondern weil sie in parasitischer Hinsicht noch eins draufsetzen: Sie sind Parasiten eines Parasiten, denn sie kapern die LINE-1-Maschinerie, um sie für die eigene Vermehrung zu missbrauchen. LINE-1 ist in der Lage, sich von ganz allein zu vervielfältigen. Alu hingegen benötigt dazu die Proteine von LINE-1 und nutzt sie für sich selbst.

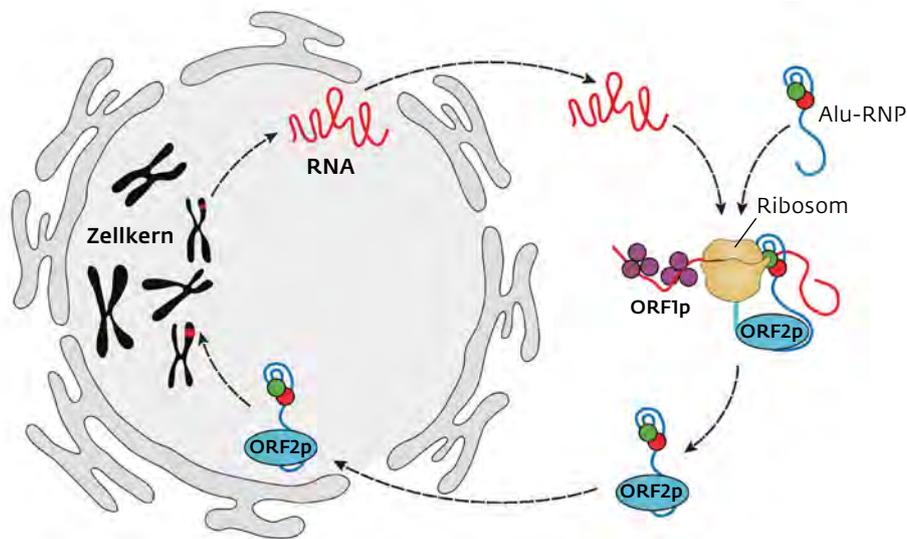
Die Transposons haben also nur die eigene Vermehrung im Blick. Der Organismus ist dafür nur Mittel zum Zweck, zu seinem Überleben scheinen sie nichts beizutragen. Auf den zweiten Blick kann er aber trotzdem von Transposons profitieren. Wenn Transposons nämlich ihre Kopien ins Erbgut einstreuen, mischen sie die DNA immer wieder neu und halten damit die Evolution am Laufen. „Das hält das Erbgut flexibel“, sagt Weichenrieder. „In Zeiten, in denen sich die Umwelt durch Klimawandel oder Naturkatastrophen stark verändert, kann sich der Organismus schneller anpassen.“ Tatsächlich konnte man für Pflanzen inzwischen nachweisen, dass Transposons besonders aktiv sind, wenn die Pflanzen unter Stress stehen – zum Beispiel bei großer Hitze.

Viele Transpositionen sind schädlich, manchmal verleihen sie einem Organismus aber auch neue, überlebenswichtige Eigenschaften. „Lange hat man geglaubt, dass die Evolution durch den Austausch einzelner Buchstaben

des genetischen Codes vorangetrieben wird, sogenannte Punktmutationen“, sagt Weichenrieder. Inzwischen aber gehen viele seiner Kollegen davon aus, dass die Transposons einen wichtigen Anteil daran haben, das Erbgut kräftig durchzumischen und so neue Variationen zu erzeugen.

PROTEINE FÜR SPRINGENDE GENE

Oliver Weichenrieder und seine Mitarbeiter sind in den vergangenen Jahren mithilfe der kleinen Proteinkristalle bis tief in die molekulare Struktur von LINE-1 und Alu vorgedrungen. In ihren Tübinger Labors stehen Apparate, mit denen die Forscher die Proteine extrahieren können, die für die Transposition von LINE-1 und Alu nötig sind. Diese Hochleistungsflüssigchromatografie-Anlagen trennen einen Mix unterschiedlicher Proteine in seine Bestandteile auf, sodass am Ende winzige Mengen eines reinen Proteins heraus-



tröpfeln. Diese werden dann in die Mikrotiterplatten mit verschiedensten Substanzen gemischt und aufkonzentriert in der Hoffnung, dass sich dabei die kleinen Kristalle bilden.

VON DER STRUKTUR ZUR FUNKTION

Und dann geht es auf die Reise: In Teilchenbeschleunigern in Zürich oder Hamburg beschließen die Wissenschaftler die Kristalle mit intensivem Röntgenlicht. Die Röntgenstrahlung wird an den Atomen der Proteine unterschiedlich abgelenkt, sodass ein charakteristisches Beugungsmuster entsteht. Computerprogramme ermitteln daraus die Elektronenverteilung im Kristall und zum Teil auch schon die chemische Struktur des Proteinmoleküls. „Dennoch gibt es für uns noch genug Handarbeit. Wir brauchen einiges an chemischem Wissen, um aus den Bruchstücken im Computer das ganze Protein zu rekonstruieren.“ Auf diese Weise haben die Tübinger Forscher die Struktur der LINE-1-Proteine und der Alu-RNA entschlüsselt.

LINE-1 benötigt vor allem zwei Proteine, um sich erfolgreich zu vervielfältigen: ORF1p und ORF2p – so viel war bekannt. Der Bauplan für diese Protei-

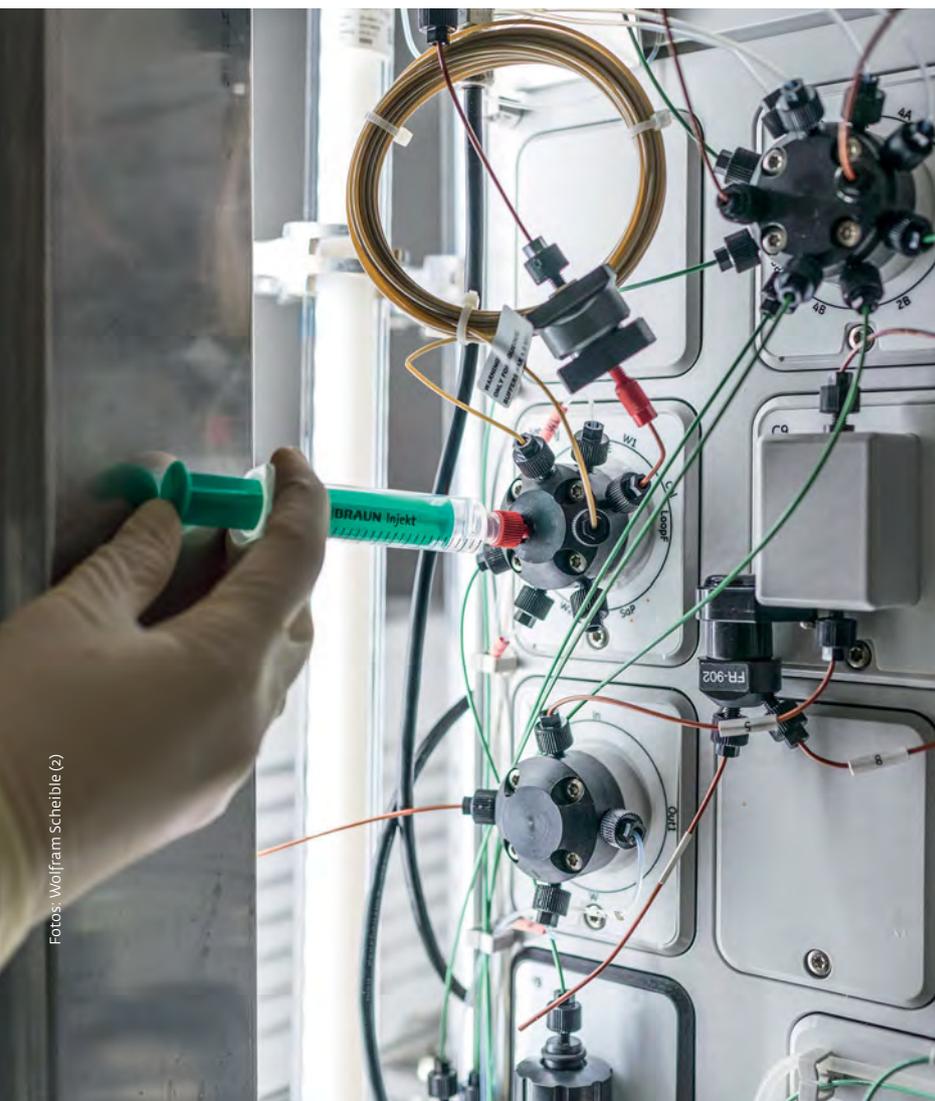
ne steht im LINE-1-Element. Wird LINE-1 aktiv, wird zuerst eine RNA-Kopie hergestellt. Diese wandert zur Proteinfabrik der Zelle, den Ribosomen, wo sie die Vorlage zur Bildung der Proteine liefert.

Lange Zeit war die Funktionsweise der beiden Proteine unbekannt. Die Aufklärung ihrer räumlichen Struktur durch die Tübinger Wissenschaftler aber brachte Klarheit: ORF1p setzt sich aus drei Untereinheiten zusammen, zwischen die sich die RNA schmiegen kann. Zudem treten stets drei ORF1-Proteine als Dreierbündel auf. „Es sieht ganz so auf, als würde sich die LINE-1-RNA an diesem Trio aufwickeln, damit sie vor den Abwehrwaffen der Zelle geschützt ist“, sagt Weichenrieder. Die Zelle ist einem Transposon nämlich keineswegs hilflos ausgeliefert. Sie kann den Kopiervorgang auf verschiedenen Wegen ausschalten, etwa durch Proteine, die die Transposon-RNA vernichten oder ORF1p angreifen. Das ORF1p-Protein schützt die LINE-1-RNA davor, die so weiter ORF2p produzieren kann.

ORF1p ähnelt zudem Proteinen, die das Verschmelzen von Zellmembranen ermöglichen. Entsprechend könnte ORF1p der LINE-1-RNA möglicherweise auch dabei helfen, die Membran des Zellkerns zu überwinden, damit sie

Oben Ein Parasit befällt einen Parasiten: Ein Komplex aus Alu-RNA und Proteinen (Alu-RNP) erkennt die Ribosomen, welche die RNA des parasitischen Line-1-Elements in ORF2p-Protein übersetzen. Der Alu-Komplex kapert das eigentlich zu Line-1 gehörende Protein und lässt sich mit diesem in den Zellkern (grau) transportieren. Dort übersetzt ORF2p die Alu-RNA und baut die resultierende DNA als neues Alu-Element ins Erbgut ein.

Rechte Seite Oliver Weichenrieder und Elena Khazina bereiten eine Chromatografie-Säule vor (oben). Sie injizieren einen vorgereinigten Zellextrakt in die Apparatur und trennen dann das Proteingemisch in seine Bestandteile auf (unten).



die DNA im Zellkern erreicht. Dorthin muss sie zurückkehren, um sich vervielfältigen zu können.

SCHNEIDEN UND UMSCHREIBEN

Zur Vermehrung benötigt sie ORF2p. Auch dessen räumliche Struktur kennen die Forscher nun genauer. Es besteht aus zwei Untereinheiten: einer Endonuklease und einer reversen Transkriptase. Die Endonuklease schneidet die DNA zunächst. Sie erkennt dabei auch spezielle DNA-Strukturen, wie sie bei der Duplikation der DNA oder kurz vor der Zellteilung auftreten. Damit wird der Weg zum Einbau der Retrotransposon-Sequenz frei: Die reverse Transkriptase wandelt dann die RNA zurück in DNA und baut diese ins Erbgut ein.

Die Ergebnisse der Forscher könnten dazu beitragen, Medikamente gegen Krebsformen zu entwickeln, bei denen Transposons das Erbgut schädigen. Solche Medikamente könnten die LINE-1-Proteine blockieren und die Transposition verhindern. Zunächst will Oliver Weichenrieder aber die Vorgänge grundsätzlich verstehen. Und dafür ist Alu als Parasit des Parasiten besonders geeignet. „Anscheinend identifiziert die Alu-



Kristallstruktur eines Alu-Ribonucleotidpartikels (RNP). Die Alu-RNA (blau) besteht aus Basen der Ribonucleinsäure (Adenin, Guanin, Cytosin und Uracil), die sich räumlich in eine fest definierte Struktur auffalten und dabei von zwei Proteinen, SRP9 (rot) und SRP14 (grün), stabilisiert werden. Der eigentliche molekulare Parasit ist also die RNA.

RNA Ribosomen, die gerade das ORF2p produzieren, ohne dabei das Protein direkt zu erkennen“, erklärt er. „Sobald das Ribosom ORF2p komplettiert hat, greift Alu zu und fischt es ab.“ Die Alu-RNA nutzt anschließend die geklaute Endonuklease und die reverse Transkriptase, um ihre eigene DNA ins Erbgut einzubauen. „Es kommt somit auch auf die Perspektive an“, sagt Weichenrieder, „denn streng genommen ist nicht die Transposon-DNA der eigentliche Parasit, sondern die daraus abgelesene Line-1- oder Alu-RNA.“

STOCKENDES FLIESSBAND

Man schätzt, dass nur etwa jedes zwanzigste Neugeborene eine neue Alu-Kopie in sich trägt und an seine Nachkommen weitergibt. Die Transposition ist deshalb nicht so häufig, weil Transposons dank der Verteidigungsmechanismen in den Zellen meist inaktiv sind. Auch die Transposition von LINE-1 findet eher selten statt. „Alu-RNA muss deshalb sehr genau wahrnehmen können, wo gerade ein LINE-1 aktiv ist und an einem Ribosom ORF2p synthetisiert“, sagt Weichenrieder – ähnlich einem Parasiten, der sein Opfer zielsicher aufspürt.

Seine Ergebnisse deuten darauf hin, dass Alu womöglich eine Art Stottern erkennt, das bei der Bildung von ORF2p am Ribosom auftritt: Einige der Aminosäuren, die bei der Produktion in das ORF2p-Protein eingebaut werden, sind Lysine. Diese gleiten nur sehr schwer durch den Produktionskanal des Ribosoms. Wenn sie gehäuft auftreten, kann das Fließband gewissermaßen ins Stocken geraten. Höchstwahrscheinlich erkennt Alu gerade dieses Stottern und ist dann rechtzeitig zur Stelle, um das fertige ORF2p abzugreifen.

Noch hat kein Forscher diesen Vorgang live beobachten können. Doch alle Indizien, die die Wissenschaftler mit ihrer Analyse der Proteinstrukturen zusammengetragen haben, deuten darauf hin. Zudem ist das Alu-Retrotransposon eng mit einem anderen Partikel verwandt, das am Ribosom die Produktion bestimmter Proteine reguliert – dem sogenannten Signalerkennerpartikel, SRP (*signal recognition particle*). Alu ist erst mit der Entwicklung der Primaten aus dem SRP entstanden, evolutionär gesehen also erst vor kurzer Zeit. Die Tübinger Forscher haben festgestellt, dass Alu-RNA wesentliche Teile der SRP-Struktur beibe-



halten hat und auch zwei kleine SRP-Proteine binden muss, damit es sich als Retrotransposon überhaupt erfolgreich vervielfältigen kann.

Für Weichenrieder sind Transposons an sich weder gut noch böse. Trotzdem fasziniert ihn die Vorstellung eines molekularen Parasiten: „Alu ist so einfach gebaut: eine kurze RNA, zwei kleine SRP-Proteine, die die Alu-RNA falten. Alles andere, was es benötigt, stiehlt es sich. Im Vergleich dazu sind schon Viren mit ihrer Informationsfülle für den Bau von Proteinen ungeheuer komplex.“

Da stellt sich die Frage, wie klein und simpel ein Parasit eigentlich sein kann, um noch zu funktionieren. Weichenrieder testet deshalb Alu-Varianten, ob sie sich noch vervielfältigen können. Dafür verkleinert er sie immer weiter und reduziert die Anzahl der beteiligten Proteine Stück für Stück. So hofft er, sein Ziel zu erreichen und den „ultimativen Parasiten“ zu finden: ein auf das Allernotwendigste reduziertes Stück RNA, das sich über das Erbgut eines Organismus erfolgreich auf dessen Kosten vermehren kann. ◀

Drei Wissenschaftler, ein Ziel: Gabriele Wagner, Oliver Weichenrieder und Elena Khazina (von links) wollen mithilfe der Analyse der Transposon-Proteine verstehen, wie sich parasitische DNA im Erbgut ausbreiten kann.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Parasitische DNA-Moleküle sind Abschnitte, die sich eigenständig auf Kosten des Organismus vervielfältigen. Im Fall von Line-1 und Alu sind dabei aber die entsprechenden RNA-Moleküle die eigentlichen molekularen Parasiten.**
- **Große Teile des Erbguts sind aus solchen Transposons hervorgegangen – bei manchen Pflanzen machen sie mehr als 80 Prozent aus. Die meisten davon sind allerdings nicht mehr aktiv.**
- **Manche RNA-Moleküle wie die Alu-RNA nutzen die Kopiermaschinerie anderer Transposons. Sie sind also Parasiten von Parasiten.**

GLOSSAR

Reverse Transkriptase: Enzym, das RNA in die entsprechende DNA-Sequenz umschreibt. Retrotransposons benötigen das Enzym, um von ihrer RNA eine DNA-Abschrift anzufertigen, die wieder ins Erbgut eingebaut wird. Entdeckt wurde das Enzym zuerst in Retroviren. Diese Viren besitzen ein Erbgut aus RNA. Damit es in das Wirtsgenom eingebaut werden kann, muss die reverse Transkriptase eine DNA-Version anfertigen.

Transposons: DNA-Abschnitte, die ihre Position im Erbgut verändern können. Man spricht deshalb auch von „springenden Genen“. Vollständige Transposons enthalten jedoch oft mehrere Gene. Transposons, deren aus der DNA abgelesene RNA nicht nur für die Produktion von Proteinen genutzt wird, sondern auch als Vorlage für die Bildung eines neuen DNA-Moleküls dient, werden als Retrotransposons bezeichnet. Die Retrotransposons sind wohl auch der Ursprung der Retroviren, die sich ebenfalls in das Erbgut des Wirts einbauen, aber diesen als kompletter Virus auch verlassen können.

Im Stichling ist der Wurm drin

Rund 40 Prozent aller Arten auf der Erde leben parasitisch – eine überaus erfolgreiche Lebensweise also. Allein ein Fisch wie der Dreistachlige Stichling wird von bis zu 25 verschiedenen Parasiten geplagt. Einer davon hat es **Martin Kalbe**, **Tina Henrich** und **Nina Hafer** vom **Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie** in Plön besonders angetan: der Bandwurm *Schistocephalus solidus*. Sie erforschen die vielfältigen Tricks, mit denen Wirt und Parasit versuchen, sich gegenseitig auszuspielen.



TEXT HARALD RÖSCH

Der Dreistachlige Stichling ist ein Kosmopolit. Sein Verbreitungsgebiet erstreckt sich über die gesamte nördliche Hemisphäre. Ursprünglich ein Bewohner der Ozeane, ist er wohl erst nach der letzten Eiszeit ins Süßwasser eingewandert und lebt jetzt auch in Flüssen und Seen. Wie im Meer sind auch im Süßwasser Parasiten allgegenwärtig: Rund-, Faden- und Bandwürmer leben auf Kosten des Fischleins, Karpfenläuse saugen sich an seiner Haut oder in seinen Kiemen fest und ernähren sich von seinem Blut. Fast jeder Körperteil des Stichlings dient irgendeinem Parasiten als Wohnstätte – sogar die Linse im Auge.

LOKALE UNTERSCHIEDE

Schistocephalus ist also nur einer unter vielen Plagegeistern, die dem Fisch das Leben schwer machen. Zusammen mit Tina Henrich hat Martin Kalbe über viele Jahre hinweg in unterschiedlichen Regionen Stichlinge und ihre Würmer gesammelt und dabei verblüffende Unterschiede festgestellt. In Norwegen beispielsweise beträgt die Infektionsrate in manchen Populationen fast 100 Prozent, in anderen wiederum ist kein einziger Fisch infiziert. Die Fische in Plön liegen eher am unteren Ende der Skala: Von 4000 Tieren ist lediglich einer von *Schistocephalus* befallen.

Einer der Gründe für diese Unterschiede ist der Lebensraum. In Flüssen und Bächen werden Parasiten durch die Wasserströmung schnell weggespült, sie kommen daher dort seltener vor als in Stillgewässern. Stichlinge, die

in kleinen, verstreuten Populationen leben, haben ebenfalls weniger unter Parasiten zu leiden. Und nicht zuletzt entscheiden die Fressfeinde des Fisches mit über die Häufigkeit von *Schistocephalus*. Denn nur wenn der Wurm im richtigen Endwirt landet, kann er seinen Lebenszyklus vollenden und Eier produzieren.

Nachdem die Eier am Grund eines Gewässers überwintert haben, schlüpfen zunächst mikroskopisch kleine, aktiv schwimmende Larven. Werden diese von einem Ruderfußkrebs – wegen seiner ruckartigen Fortbewegung auch Hüpferling genannt – für Beute gehalten und verspeist, entwickeln sie sich weiter zum zweiten Larvenstadium. Der winzige Krebs ist jedoch nur der erste Zwischenwirt. Als Nächstes folgt der Stichling. Wenn dieser den Hüpferling frisst und es der Larve gelingt, unbeschadet durch den Fischmagen zu gelangen, bohrt sich diese durch die Darmwand des Fisches. Wichtig dabei ist der Zeitpunkt: Am größten sind die Erfolgsaussichten, wenn sich die Larve 13 bis 15 Tage lang im Krebs entwickeln kann und dann in den Stichling gelangt.

In der Bauchhöhle des Fisches erreicht die Larve das dritte Larvenstadium und legt massiv an Größe und Gewicht zu. Dann muss sie wieder warten, bis ihr Wirt gefressen wird. Für die *Schistocephalus*-Larve ist dies geradezu überlebenswichtig. Aber von entscheidender Bedeutung ist auch: Sie muss im richtigen Magen landen. In ihrem Fall heißt das: im Verdauungstrakt eines Warmblüters. In der Regel sind das fischfressende Vögel wie etwa Reiher,

Eisvögel oder Kormorane. Nur bei einer Umgebungstemperatur von mindestens 38 Grad können die Larven zu geschlechtsreifen Würmern heranreifen, einen Partner finden und sich paaren. „Im Plöner See zum Beispiel fallen die meisten Stichlinge Kaltblütlern wie Barschen und Hechten zum Opfer. Der Lebenszyklus des Parasiten endet so in einer Sackgasse. Aus diesem Grund sind hier nur so wenige Stichlinge infiziert“, erklärt Henrich.

EVOLUTIONÄRES WETTRÜSTEN

Der Stichling und sein Wurm befinden sich in einem permanenten Wettlauf gegeneinander. Jeder Vorteil des einen wird sofort vom anderen gekontert. Resultat ist ein evolutionäres Wettrüsten, in dem die Kontrahenten einander permanent ausspielen wollen – wie zwei Ringer, die für jeden neuen Angriff den entsprechenden Abwehrgriff bereithalten.

Wie sehr Wirt und Parasit miteinander ringen, zeigt sich indirekt, wenn Dreistachliger Stichling und *Schistocephalus solidus* aus unterschiedlichen Gegenden aufeinandertreffen: Die Bandwürmer haben sich sogar an die kleinen regionalen Unterschiede zwischen den Fischen angepasst. Henrich und Kalbe haben in Kanada, Norwegen und Deutschland Stichlinge und ihre Parasiten gefangen und sie in ihrem Plöner Labor in verschiedenen Kombinationen zusammengebracht. Die Würmer sind zwar ähnlich infektiös und werden gleich groß, wenn sie Fische aus ihrer jeweiligen Heimat infiziert haben. „*Schistocephalus* aus Norwegen scheint aber aggressiver zu sein als seine deut-

Dreistachliger Stichling mit dem Bandwurm *Schistocephalus solidus*: Die Parasitenlarve hat sich durch die Darmwand gebohrt und wächst in der Leibeshöhle des Fisches heran. Dort kann sie so schwer werden wie der Fisch selbst.



Seinen Namen verdankt der Dreistachlige Stichling den drei Stacheln auf dem Rücken, die er bei Gefahr aufstellen kann. Während der Laichzeit färbt sich der Rücken der ansonsten unscheinbaren Männchen türkis, Kehle und Brust leuchten rot. Die Männchen besetzen ein Brutrevier und bauen am Boden ein Nest aus Pflanzenteilen. Sie vertreiben die Weibchen nach der Eiablage und bewachen und pflegen die Gelege fortan allein.

schen Artgenossen, denn er infiziert Fische aus dem Plöner See häufiger und wächst in ihnen stärker als ein deutscher Wurm in kanadischen oder norwegischen Fischen“, sagt Henrich.

AGGRESSIVE WÜRMER

Warum manche Lokalformen der Würmer aggressiver sind als andere, wissen die Forscher noch nicht, aber eines ist klar: Parasit und Wirt haben sich so aneinander angepasst, dass die aggressiven Würmer die Unterschiede zwischen den Fischpopulationen zu ihren Gunsten ausnützen können. Und noch eine verblüffende Erkenntnis haben Kalbe und Henrich gewonnen: Infizieren ein norwegischer und ein deutscher Wurm gemeinsam einen Fisch aus dem Plöner See, so bleibt der norwegische Wurm kleiner, als wenn er allein den Fisch befällt. Dies ist zu erwarten, er muss schließlich die Nährstoffe teilen. Der deutsche Wurm dagegen wird dann seltsamerweise größer als sonst. Der norwegische Wurm scheint das Wachstum seines Konkurrenten irgendwie zu begünstigen – wie, ist noch unklar.

Unterschiede in der Anpassung erklären auch, warum *Schistocephalus solidus* ausschließlich den Dreistachligen Stichling infiziert: „Er hat sich einfach so gut auf diese Art spezialisiert, dass er die Abwehrstrategien anderer Fische nicht mehr überwinden kann“, so Henrich. Beispielsweise die des nah verwandten Neunstachligen Stichlings. Dieser lebt in denselben Gewässern wie sein Vetter und wird von *Schistocephalus pungitii* parasitiert. Obwohl sich die beiden Bandwürmer nur in ihrer „eigenen“ Fischart weiterentwickeln, können sie sich im Labor miteinander kreuzen und fruchtbare Nachkommen zeugen. Die aus einer solchen Kreuzung hervorgehenden Wurmhybriden befallen sowohl den Drei- als auch den Neunstachligen Stichling. „Solche Mischlinge haben wir aber bislang in keinem Gewässer entdeckt. Warum sich die beiden Arten in der Natur nicht vermischen, obwohl sie es könnten, wissen wir noch nicht“, sagt Henrich.

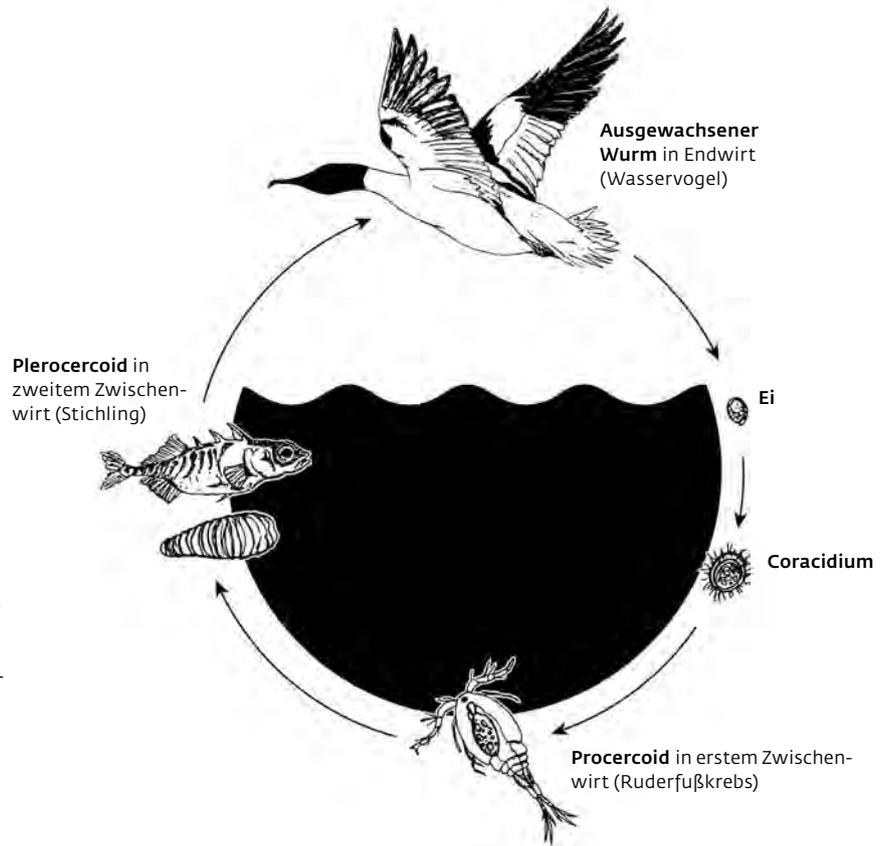
Die Plöner Wissenschaftler sind nicht die Einzigen, die das Wettrüsten zwischen Dreistachligem Stichling und *Schistocephalus solidus* erforschen. Seit

den 1960er-Jahren werden der Stichling und sein Bandwurm im Labor untersucht. Heute dienen der Fisch und sein Parasit einer Reihe von Forschungsgruppen weltweit als Modellsystem. Ein Grund dafür ist, dass sich beide verhältnismäßig leicht im Labor vermehren lassen. Besonders unkompliziert zu halten sind die Stichlinge. Sie stellen keine großen Ansprüche. In handelsüblichen Aquarien lassen sie sich leicht zur Eiablage bewegen.

LEBENSZYKLUS IM LABOR

Die Wurmeier wiederum kann Henrich lange Zeit bei vier Grad im Dunkeln aufbewahren. Licht lässt die Larven schlüpfen. Die Wissenschaftlerin gibt jede Larve zusammen mit einem Hüpfertling in die Vertiefung einer laborüblichen Zellkulturplatte und wartet, bis der kleine Ruderfußkrebs die Parasitenlarve aufgenommen hat. Den infizierten Krebs verabreicht sie dann einem Stichling.

Lediglich der letzte Schritt des Zyklus weicht von seinem natürlichen Vorbild ab, denn Wasservogel zu hal-



Aus den Wurmeiern schlüpft das erste Larvenstadium (Coracidium). Wird die frei schwimmende Larve von einem Ruderfußkrebs (Hüpfertling) gefressen, entwickelt sie sich in der Leibeshöhle des Krebses zum zweiten Stadium weiter, dem Procercoid. Der Krebs ist eine bevorzugte Nahrung des Dreistachligen Stichlings. Im Fisch bohrt sich die Wurmlarve durch die Darmwand und wird zum Plerocercoid. Ein fischfressender Vogel ist dann der Endwirt des Parasiten. Im Vogeldarm produzieren die ausgewachsenen Würmer Eier, welche über den Kot in die Gewässer gelangen.

ten und darin die Bandwürmer zu vermehren, wäre zu aufwendig. Stattdessen verwenden Henrich und ihre Kollegen einen Ersatz für den Vogeldarm: eine kleine Tasche aus Nylongaze, umgeben von einer speziellen Nährlösung. Obwohl die Taschen ursprünglich für die Aufnahme von Gewebeproben in der Medizin gedacht sind, muss Henrich sie mehrere Stunden in kochendem Wasser auskochen. Erst dann sondern sie keine für die Würmer schädlichen Substanzen mehr ab. In solchen Taschen, umspült von einer geeigneten Nährlösung bei angenehmen 38 Grad, schreitet ein Wurmpanchen bereitwillig zur Fortpflanzung und gibt schließlich Tausende von Eiern ab.

Auf diese Weise haben es die Plöner Forscher geschafft, den Parasiten zu überlisten und ihm einen Vogeldarm vorzugaukeln. „Einen Endwirt zu simulieren, ist einfacher, als einen künstlichen Zwischenwirt zu entwickeln. Im Vogel kann *Schistocephalus* nicht mehr wachsen, sondern sich nur noch paaren und Eier produzieren. Da er dem Vogel damit nicht schadet, hat dieser

keine Abwehrmaßnahmen entwickelt, an die sich der Wurm anpassen musste. Mit dem Stichling dagegen verbindet ihn eine so innige Beziehung, die ließe sich im Labor kaum nachstellen“, sagt Henrich.

FREMDGESTEUERTE WIRTE

Parasiten sind aber viel mehr als blinde Passagiere, die nur auf Kosten ihrer Wirte leben und sich von diesen verköstigen lassen. Zunächst müssen sie die Verteidigungsstrategien ihrer Wirte abwehren. Dann manipulieren sie häufig den Stoffwechsel ihrer Wirte so, dass für sie selbst möglichst viele Nährstoffe abfallen. Am faszinierendsten und zugleich am unheimlichsten ist aber ihre Fähigkeit, das Verhalten ihrer Wirte umzuprogrammieren. Das kann so weit gehen, dass ein Organismus sein eigenes Leben opfert, damit sich der Parasit fortpflanzen kann. In solchen Fällen wird der Wirt förmlich fremdgesteuert.

„Manche Wirte hängen wie Marionetten an den Fäden ihrer Parasiten“, sagt Manfred Milinski, seit April eme-



Mitunter wachsen mehrere Bandwurmlarven in einem Stichling heran – in manchen Fällen über 20. Ihr Gewicht kann am Ende höher sein als das ihres Wirts. Die Parasiten bringen den Fisch zwar nicht um, aber sie entziehen ihm Nährstoffe, sodass der Stichling kleiner bleibt als ein nicht infizierter Artgenosse.



Links Stichlinge lassen sich gut im Aquarium halten und vermehren. Im Plöner Max-Planck-Institut werden die Fische in den kleinen Becken (Mitte) mit infizierten Hüpferlingen gefüttert und so gezielt mit den Bandwürmern infiziert.

Rechts Daniel Martens, Tina Henrich und Christoph Gahr (von links) setzen im Labor aufgezogene Stichlinge in Käfige im Großen Plöner See. So können die Forscher untersuchen, ob und wie stark die Fische, die noch nie mit Parasiten konfrontiert waren, befallen werden.

ritierter Direktor der Abteilung Evolutionsökologie am Plöner Max-Planck-Institut. Er hat den Stichling und seine Würmer seit den 1980er-Jahren erforscht. „Wenn man bedenkt, dass es so gut wie kein Lebewesen ohne Parasiten gibt, muss man sich fragen, was das eigentliche Verhalten eines Organismus und was fremdgesteuert ist.“

EINZELLER MANIPULIERT MENSCH

Nicht einmal der Mensch ist davor gefeit, von seinen Parasiten manipuliert zu werden: Der Einzeller *Toxoplasma gondii* zum Beispiel tut alles dafür, Mensch und Katze zusammenzubringen. Den Menschen braucht er als Zwischenwirt, der ihm helfen soll, in seinen Endwirt zu gelangen. Denn nur im Darm von Raub- oder Hauskatzen kann der Parasit neue Eier produzieren. Heute wird *Toxoplasma* zwar vor allem von Mäusen und Ratten auf Hauskatzen übertragen, und der Mensch ist für den Parasiten eine Sackgasse. Doch als der Mensch in der Frühzeit seiner Entwicklung noch regelmäßig Opfer von

Raubkatzen wurde, war er möglicherweise ein häufiger Zwischenwirt von *Toxoplasma gondii*.

Das würde erklären, warum sich infizierte Menschen von Katzen besonders angezogen fühlen. Damit sein Zwischenwirt von Raubkatzen leichter gefressen werden kann, scheint *Toxoplasma* das menschliche Gehirn so umzuprogrammieren, dass Menschen ihre angeborene Vorsicht gegenüber allen Katzen verlieren. So empfinden infizierte Männer einer Untersuchung zufolge den Urin von Hauskatzen als angenehmer als nicht infizierte Probanden. Auf Mäuse und Ratten scheint der Erreger dieselbe Wirkung zu haben: Während die Nager gewöhnlich sofort das Weite suchen, wenn sie eine Katze riechen, werden infizierte Mäuse von Katzengeruch sogar angelockt.

Eine ganze Reihe von Studien belegt inzwischen, dass *Toxoplasma* das menschliche Verhalten auch noch auf andere Weise beeinflusst. Demnach manipuliert der Einzeller das Nervensystem so, dass die Reaktionszeit länger wird und sich Menschen häufiger



Schistocephalus solidus ist nicht der einzige Plagegeist im Großen Plöner See. Fast jeder Wasserbewohner besitzt eigene Parasiten. Martin Kalbe sammelt zum Beispiel Wasserschnecken, um ihre Parasiten zu untersuchen.

über soziale Normen hinwegsetzen. Eine mögliche Folge: Mit *Toxoplasma gondii* infizierte Menschen sind öfter in Verkehrs- und Arbeitsunfälle verwickelt.

Die Folgen könnten dramatisch sein: „Man schätzt, dass mehr als 30 Prozent der Weltbevölkerung infiziert sind. Möglicherweise gehen also jedes Jahr allein Tausende Verkehrstote auf das Konto des Parasiten“, sagt Milinski.

KAMPF UM DIE HERRSCHAFT

Inzwischen sind viele Fälle von Manipulationen durch Parasiten bekannt, viele weitere harren vermutlich noch ihrer Entdeckung. Und auch wie es Parasiten schaffen, das Verhalten ihrer Wirte in ihrem Sinne zu verändern, liegt meist noch im Dunkeln. „Eine Infektion mit einem Parasiten bewirkt mehr als nur die unmittelbare körperliche Reaktion darauf. Wenn wir besser verstehen, wie Parasiten ihre Wirte ma-

nipulieren, ergäbe manches sinnlos erscheinende Verhalten vielleicht einen Sinn“, so Milinski.

Hinzu kommt, dass viele Organismen nicht nur mit einem, sondern mit mehreren unterschiedlichen Parasiten befallen sind, die nicht nur den Wirt, sondern auch sich gegenseitig beeinflussen. „Man kann in solchen Fällen von einem regelrechten Krieg um die Herrschaft über den Wirt sprechen“, sagt Milinski.

Einen solchen Fall hat Nina Hafer in Milinskis Abteilung untersucht. Im Plöner See und anderswo können die Ruderfußkrebse nämlich nicht nur vom Bandwurm *Schistocephalus solidus*, sondern auch von einem Fadenwurm namens *Camallanus lacustris* befallen werden. Beide Parasiten müssen sich im Krebs erst eine gewisse Zeit entwickeln, bevor sie einen Fisch infizieren können. In dieser Phase sollte sich der Krebs folglich möglichst unauffällig verhal-

ten, damit er nicht gefressen wird und die Parasiten mit ihm sterben. Doch sobald sie infektiös sind, profitieren sie von einer hohen Aktivität ihres Wirts.

KONFLIKT DER INTERESSEN

Verläuft diese Entwicklung parallel, herrscht Harmonie: Beide Wurmarten wollen dasselbe und steuern den Ruderfußkrebs so, dass er sich zunächst ruhig und später möglichst aktiv verhält. Aber was geschieht, wenn der Ruderfußkrebs von Würmern in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befallen ist? „Ein solcher Interessenkonflikt zwischen Parasiten derselben oder unterschiedlicher Arten muss in der Natur die Regel sein, ist bisher aber kaum untersucht worden“, sagt Hafer.

Sie hält die infizierten Hüpfertlinge im Labor in den Zellkulturplatten und bestimmt alle zwei Sekunden mit einer Kamera deren Position. Eine Erschüt-



Oben Mit entsprechender Vergrößerung werden die heimlichen Untermieter sichtbar: Oft befallen mehrere Parasiten ein und denselben Krebs, wie hier der Bandwurm *Schistocephalus solidus* (grün) und der Fadewurm *Camallanus lacustris* (blau) einen Ruderfußkrebse. Befinden sich die Parasiten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien, kommt es zu einem Interessenkonflikt.

Unten Ruderfußkrebse sind die ersten Zwischenwirte der Bandwürmer. In einem Wassertropfen lassen sich die etwa einen Millimeter großen Krebse unter dem Mikroskop gut beobachten.

terung der Platte gaukelt den Krebsen dann den Angriff eines Stichlings vor. Auf diese Weise kann sie mögliche Unterschiede in der Aktivität von Hüpferlingen entdecken, die sie mit unterschiedlichen Kombinationen aus infektiösen und nicht infektiösen Faden- und Bandwürmern infiziert hat.

SABOTAGE IM HÜPFERLING

Ihre Messungen zeigen eindeutig: Die Krebse sind immer aktiver, wenn sie mit einem infektiösen Wurm infiziert sind – auch wenn ein nicht infektiöser Parasit dagegenarbeitet. Der infektiöse Parasit sabotiert demnach die Manipulationen des kleineren, nicht infektiösen Wurms. Dies ist jedoch keine Folge der Größe, denn ein infektiöses Tier kann auch zwei nicht infektiöse Würmer unterdrücken, die zusammen mehr Masse auf die Waage bringen.

Mit diesem Ergebnis hätte die Biologin nicht gerechnet. „Eigentlich muss der infektiöse Wurm ja nur ein wenig warten, bis er den nächsten Wirt erreicht und sich fortpflanzen kann. Der nicht infektiöse Parasit dagegen stirbt zwangsläufig, wenn er zu früh gefressen

wird. Er hat also deutlich mehr zu verlieren und müsste versuchen, seinen Konkurrenten um jeden Preis zu überlisten“, erklärt Hafer.

Eine endgültige Erklärung für den überraschenden Befund hat Hafer noch nicht. „Vielleicht ist das Interesse des infektiösen Parasiten an einer schnellen Übertragung auf den Fisch doch größer als gedacht. Schließlich könnte der Ruderfußkrebse auch einfach vorzeitig sterben, ohne gefressen zu werden. Damit wäre auch das Schicksal des Wurms besiegelt“, so Hafer. Möglicherweise fällt es dem Wurm aber auch nur leichter, seinen Kontrahenten auszutricksen, denn auch ein infektiöser Parasit war einmal nicht infektiös und hat das Verhalten des Krebses manipuliert. Es liegt nahe, dass er alte Sabotagemechanismen später einfach abschaltet – und damit ganz nebenbei auch die des nicht infektiösen Konkurrenten.

In Experimenten mit verschiedenen Zwischenwirt- und Parasitenpopulationen aus Deutschland und Norwegen hat Hafer zudem herausgefunden, dass die infektiösen *Schistocephalus*-Larven aus Deutschland die Hüpferlinge stärker manipulieren – unabhängig davon, woher

Sunrise!

Mit einem 130 Meter großen Heliumballon hat die Stiftung am Max-Planck-Institut für Sonnen-systemforschung den Flug eines der größten Sonnenteleskope gefördert, das je den Erdboden verlassen hat. Mit Sami Solankis Observatorium SUNRISE wurden die Magnetfelder der Sonne in höchster Auflösung beobachtet. Nun 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



MAX PLANCK FÖRDERSTIFTUNG
FOUNDATION

www.maxplanckfoundation.org

die Krebse stammen. Unterschiedliche Kombinationen aus Hüpfertlingen und Wurmlarven aus Deutschland und Norwegen zeigen darüber hinaus ein vergleichbares Ausmaß an Wirtsmanipulation. In ihrer Manipulationsfähigkeit haben sich die Larven also offenbar nicht an unterschiedliche Populationen von Zwischenwirten angepasst.

SCHUTZ VOR KRANKHEITEN

Hafer hat also erstmals gezeigt, dass ein Parasit auch eine nicht näher mit ihm verwandte Parasitenart sabotiert. Dies kann die Ausbreitung von Krank-

heiten beeinflussen. „Ein Parasit könnte zum Beispiel die Manipulationen von Krankheitserregern ganz oder teilweise abschalten und dadurch verhindern, dass sich eine Infektion weiterverbreiten kann“, sagt Hafer. Mit Malaria-Erregern infizierte Mücken stechen beispielsweise seltener, solange die Erreger noch nicht reif für eine Übertragung auf den Menschen sind. Die Tricks der Parasiten könnten künftig also Infektionsbiologen und Medizinern Ideen zu neuen Behandlungsmethoden liefern. ◀

 www.tinyurl.com/y9fd2l6y

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Der Bandwurm *Schistocephalus solidus* entwickelt sich ausschließlich im Dreistacheligen Stichling zum geschlechtsreifen Parasiten. Die Parasiten sind an die Fische aus ihrem eigenen Ursprungsgebiet am besten angepasst.
- Befallen Larven unterschiedlicher Entwicklungsstadien einen Hüpfertling, so können Interessenkonflikte zwischen den Parasiten darüber entstehen, wie sie ihren gemeinsamen Zwischenwirt manipulieren. Dabei setzt sich eine infektiöse Wurmlarve gegenüber einer nicht infektiösen durch.

GLOSSAR

Bandwürmer: Zu den Plattwürmern gehörende Klasse von Parasiten. Weltweit sind rund 3500 Arten bekannt. Als geschlechtsreife Würmer leben sie meistens im Darm von Wirbeltieren einschließlich des Menschen. Ihre Larven entwickeln sich vor allem in Gliederfüßlern, Blutegelein, Schnecken oder Wirbeltieren. Sie besitzen keinen Darm und nehmen ihre Nahrung über die gesamte Körperoberfläche auf. Die kleinsten Arten werden nur wenige Millimeter lang, der Fischbandwurm kann dagegen bis zu 15 Meter lang werden.

Toxoplasmose: Müdigkeit, Fieber oder Kopfschmerzen sind in der Regel die häufigsten Symptome einer Infektion mit *Toxoplasma gondii*. Nach der akuten Phase kapselt das Immunsystem die Einzeller dauerhaft in Zysten ein. Diese verursachen lokale Entzündungen in den betroffenen Geweben, unter anderem auch im Gehirn. Bei geschwächtem Immunsystem kann aus der latenten eine schwere akute Infektion werden, die zu einer tödlich verlaufenden Hirnhautentzündung führen kann. Bei Infektionen unmittelbar vor oder während einer Schwangerschaft können die Erreger von der Mutter auf das Kind übertragen werden und zu Missbildungen des Fötus führen. Infektionswege sind der Verzehr von rohem, mit den Erregern infiziertem Fleisch, die Aufnahme von Eiern, von verunreinigtem Gemüse und Wasser sowie Körperkontakt mit infizierten Hauskatzen. Möglicherweise kann *Toxoplasma* auch sexuell übertragen werden.

Gefahr aus der Pfütze

Zugegeben, das Forschungsobjekt ist nicht gerade appetitlich: „Kotälchen“ – kleine parasitische Würmer, die im Darm eines Wirts leben und diesem unter Umständen arg zusetzen. Der so titulierte Zwergfadenwurm *Strongyloides stercoralis* ist für **Adrian Streit** vom **Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie** in Tübingen dennoch faszinierend, denn er hat einen einzigartigen Lebenszyklus – und bis heute weiß niemand so recht, warum.

TEXT **CATARINA PIETSCHMANN**

Fadenwürmer als kurios zu bezeichnen, ist fast schon eine Untertreibung, denn seltsames Verhalten ist bei ihnen völlig normal: Der unter anderem auf der Pazifikinsel La Réunion lebende *Pristionchus pacificus* zum Beispiel sucht sich eine Käferlarve, klettert darauf und stoppt dann seine Entwicklung. Sobald der Käfer das Zeitliche gesegnet hat, entwickelt sich der Wurm weiter, frisst sich am Kadaver satt und vermehrt sich (MAXPLANCKFORSCHUNG 1/2014).

Aber im Vergleich zu *Strongyloides* ist das fast schon spießig. Am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie erforscht Adrian Streit, wie dieser Wurm in zwei Welten überleben kann. *Strongyloides* kann nämlich zwischen parasitischen auch frei lebende Generationen ausbilden. Parasiten sind ausschließlich Weibchen, die sich im Darm ihres Wirts durch Jungfernzeugung vermehren. „Sie produzieren männli-

che und weibliche Eier, die mit dem Kot ausgeschieden werden“, erklärt Streit. „Aus den weiblichen Eiern können sich entweder direkt infektiöse Larven entwickeln, die gleich in den Wirt zurückkriechen. Oder es entstehen frei lebende Würmer, die sich mit Männchen paaren.“

PARASITISCHE WEIBCHEN

Die männlichen Würmer sind ausschließlich frei lebend. Pflanzen sich Männchen und Weibchen im Boden fort, bilden sich nur parasitisch lebende weibliche Nachkommen. Diese zweite Larvengeneration muss deshalb wieder einen Wirt finden, um sich vermehren zu können – was dann wieder ohne männlichen Partner geschieht.

Viele Wirbeltierarten an Land besitzen ihren eigenen *Strongyloides* – auch der Mensch. Die Weltgesundheitsorganisation schätzt, dass weltweit mehr als

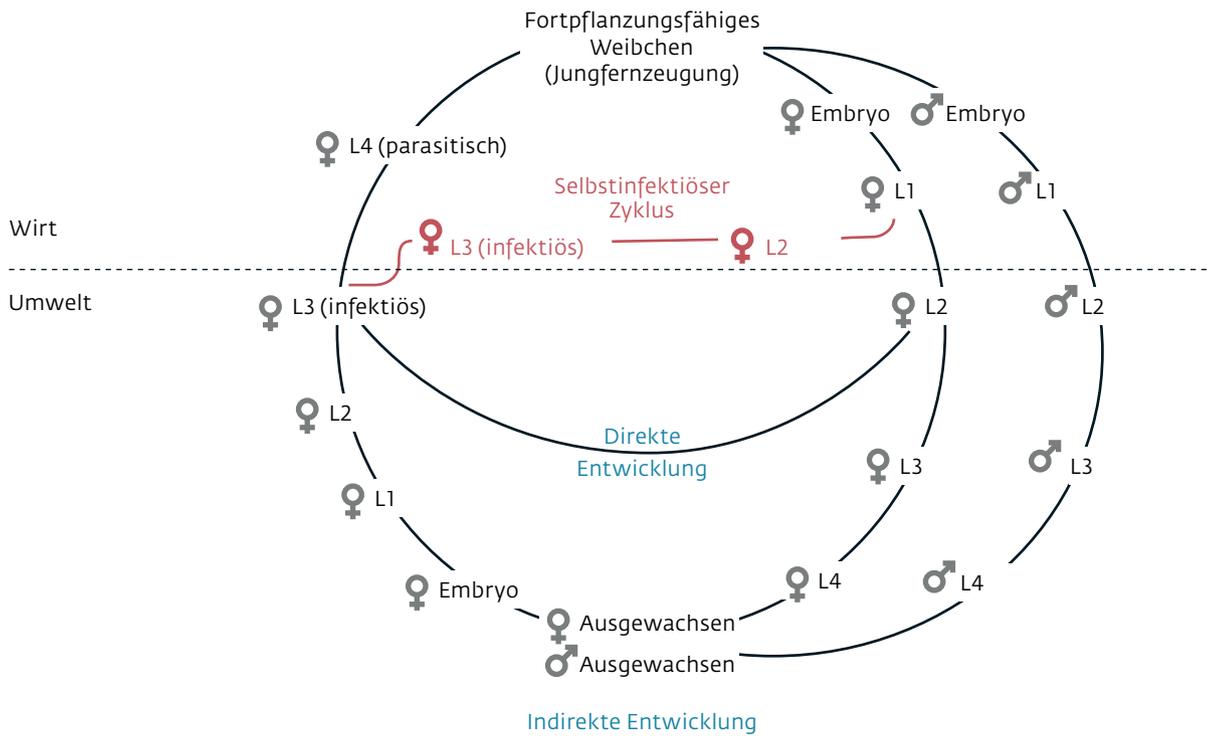
300 Millionen Menschen mit dem Zwergfadenwurm infiziert sind, vor allem im Norden Südamerikas, in Zentralafrika und Asien. Feuchtwarmes Klima plus mangelnde Hygiene sind ein Eldorado für Würmer!

Bei gesunden Menschen verläuft die Infektion meist unerkannt, denn sie beherbergen nur vergleichsweise wenige Würmer. Bei Patienten mit geschwächtem Immunsystem können die Larven jedoch vom Darm aus weitere Organe infizieren und lebensbedrohliche Infektionen auslösen, die sogenannte Strongyloidiasis. „Wird der Parasit beispielsweise bei Krebspatienten nicht erkannt, kann eine Chemotherapie zum Desaster werden“, betont Streit.

Auch Organempfänger sind gefährdet: Selbst in westlichen Ländern ist es nach Transplantation wegen der Würmer schon zu Todesfällen gekommen. In den Niederlanden wurden zwei Fälle bekannt, in denen die Infektion nach-



Wo der Boden von tierischen und menschlichen Exkrementen verunreinigt ist, sollte man tunlichst nicht barfuß laufen. Manche Parasiten wie der Zwergfadenwurm *Strongyloides stercoralis* bohren sich nämlich durch die Haut ihrer Wirte. Der Wurm vermehrt sich im Darm und gelangt über die Ausscheidungen wieder in die Umwelt.



Lebenszyklus von *Strongyloides stercoralis*: In einem Wirt sind alle Würmer Weibchen. Diese produzieren durch Jungfernzeugung weibliche und männliche Nachkommen (L1 bis L4: Larvenstadium 1 bis 4). Weibchen können einen von drei Zyklen einschlagen: einen direkten, einen indirekten oder einen selbstinfektösen. Bei Letzterem infiziert sich der Wirt erneut mit Parasiten, die bereits in seinem Körper vorhanden sind. Männchen durchlaufen dagegen ausschließlich den indirekten Kreislauf und sind frei lebend. Sämtliche Nachkommen aus dem indirekten Zyklus sind Weibchen und werden zu Parasiten.

weislich über gespendete Organe übertragen worden ist – der Spender hatte 20 Jahre zuvor in Südamerika gelebt. „Ein größeres medizinisches Problem ist die Wurminfektion hierzulande noch nicht. Aber diese Fälle sind Anlass genug, sich damit zu beschäftigen“, meint Streit.

Dass die Infektion so lange unbemerkt bleibt, ist nicht ungewöhnlich, denn sie kann völlig beschwerdelos verlaufen. Die klassischen Symptome – Hautausschlag, Übelkeit, Durchfall, Bauchkrämpfe – sind zudem unspezifisch. Deshalb können die Würmer leicht übersehen werden. Tragisch, denn gängige Wurmmittel hätten ausgereicht, um die Parasiten abzutöten.

Mangelnde Sanitärhygiene führt dazu, dass der Wurm von Mensch zu Mensch übertragen wird. Aber ist das tatsächlich der einzige Weg? Adrian

Streit treibt die Frage um, ob die Strongyloidiasis zu den sogenannten Zoonosen gehört, also von Tieren, zum Beispiel Hunden, auf den Menschen übertragen werden kann. Wenn dem so wäre, müssten sich bei Hund und Herrchen Würmer mit identischer DNA finden lassen.

FELDESTUDIE IN KAMBODSCHA

Um mehr über die Übertragungswege zu erfahren, hat sich Streit mit dem Schweizerischen Tropen- und Public Health-Institut in Basel und dem kambodschanischen National Center for Parasitology, Entomology and Malaria Control zusammengetan. Die beiden Institute unterhalten im Norden Kambodschas ein Feldlabor. Die ländliche Region ist ideal dafür: Die Häuser der Bauern stehen auf Stelzen – oben lebt die Familie, darunter die Tiere, meist

Schweine und Hunde. Die sanitären Anlagen sind alles andere als hygienisch, und die Einwohner gehen barfuß oder tragen nur offene Sandalen.

In dem feuchten, mit Kot kontaminierten Boden halten sich Fadenwürmer über Wochen. Die Larven bohren sich in die Haut und bewegen sich dort mit zehn Zentimetern pro Stunde fort – ziemlich schnell für die weniger als einen Millimeter kurzen Wesen! Mediziner nennen sie deshalb respektvoll „Rennlarven“. In der Umgebung der Würmer kommt es meist zu Hautreizungen.

Als Nächstes bohren sie sich durch die Wand eines Blutgefäßes und werden dann im Blut in die Lunge gespült. Auch dort dringen sie durchs Gewebe und wandern die Luftröhre noch oben. „Erst hochgehustet, dann verschluckt, so gelangen sie in den Verdauungstrakt“, erklärt Streit.



Oben Frei lebendes, etwa einen Millimeter langes Weibchen von *Strongyloides papillosus*: Am oberen Ende befindet sich die Mundöffnung mit dem Schlund. Daran schließt sich der Darm an. Über die mittig auf der rechten Seite liegende Vulva gibt das Tier seine Eier ab.

Unten Kopulationsorgan eines frei lebenden Männchens von *Strongyloides papillosus*. Die kleinen stäbchenförmigen Strukturen sind anhaftende Bakterien.



In der Dünndarmschleimhaut legt jedes Weibchen bis zu tausend unbefruchtete Eier pro Tag. Sie werden zum größten Teil mit dem Kot ausgeschieden. Der menschliche Parasit hat jedoch die unangenehme Eigenschaft, dass sich ein Teil der Embryonen bereits im Wirt zu infektiösen Larven entwickelt. Diese dringen in die Darmwand ein oder bohren sich durch die Analschleimhaut zurück in den Körper. Das ist der Grund, weshalb die Infektion, unbehandelt, sehr lange bestehen bleiben kann.

In Kambodscha nahmen Streits Doktoranden Tegegn Jaleta und Siyu Zhou mit Einverständnis der Dorfbewohner Kotproben von Mensch und Tier. „Das war für die Leute dort ein riesiges Ereignis“, sagt Streit schmunzelnd. „Viele kamen, um zu helfen.“ Die Menschen konnten sich von Mitarbeitern der beiden Institute kostenlos behandeln und erklären lassen, wie sie sich vor einer Infektion schützen können.

Die gesammelten Proben wurden zunächst für zwei Tage bebrütet und in Wasser gelegt; später wurden die im Wasser schwimmenden Wurmlarven abgetrennt. Genetische Untersuchungen waren jedoch im dürftig eingerichteten Feldlabor des Dorfs nicht möglich. Also mussten die Wissenschaftler die Würmer nach Deutschland ausfliegen – dabei war jeder Wurm einzeln in ein Röhrchen mit Ethanol eingelegt. „Der Zoll war zuerst wenig begeistert. Aber als klar war, dass die Würmchen nicht lebendig und außerdem steril verpackt auf die Reise gehen, waren die Beamten beruhigt“, erzählt Streit.

In ihrem Tübinger Labor haben Streit und seine Kollegen dann das Erb-

gut der Würmer untersucht. Die Analyse ergab, dass eine der zwei *Strongyloides*-Populationen, welche die Forscher im Kot der Hunde gefunden hatten, genetisch mit der aus den Exkrementen ihrer Besitzer identisch war. Die Populationen überlappen also. Hunde müssen folglich ernsthaft als Überträger in Betracht gezogen werden.

Als Nächstes will Streit untersuchen, ob Hunde die einzigen Überträger für den Menschen sind. Wasserbüffel wären dafür ebenfalls Kandidaten, denn in vielen Gegenden pflügen Bauern ihre Reisfelder noch mit Wasserbüffeln und barfuß. So zum Beispiel im Süden Chinas: Dort waren die Tiere Studien zufolge die Hauptüberträger von Bilharziose. Die Erkrankung wird durch Saugwürmer verursacht.

„Obwohl eine Behandlung der Patienten durchaus erfolgreich war, konnte der Wurm durch die Behandlung von Menschen allein kaum zurückgedrängt werden. Trotzdem ist es gelungen, die Infektion in China unter Kontrolle zu bekommen, allerdings erst, als man auch die Wasserbüffel entwurmt“, sagt Streit. >



Oben links Für ihre Feldstudie in Kambodscha sammeln die Tübinger Forscher Stuhlproben von Dorfbewohnern ein, mischen die Proben mit Sägespänen und kultivieren sie in Petrischalen. So können sich die darin enthaltenen Würmer weiterentwickeln.

Oben rechts In einem Feldlabor bereiten Siyu Zhou und Tegegn Jaleta die Proben für den Transport nach Deutschland vor. Dort können die Würmer dann genetisch untersucht werden.

Unten Dorfleben im Norden Kambodschas: Mensch und Tier leben eng zusammen und kommen immer wieder mit den Ausscheidungen des jeweils anderen in Kontakt. Auf diese Weise können Darmparasiten leicht übertragen werden.



» Feuchtwarmes Klima plus mangelnde Hygiene sind ein Eldorado für Würmer.

Ein Vorbild für den Umgang mit *Strongyloidiasis*? Um das herauszufinden, plant Streit ein ähnliches Projekt wie in Kambodscha nun im Südwesten Chinas. Dort gibt es nicht nur ländliche Regionen, in denen die Zwergfadenwürmer reichlich vorkommen, sondern auch hoch qualifizierte Wissenschaftler mit gut ausgestatteten Laboren.

Erkennen lässt sich die Wurminfektion unter dem Mikroskop. Für Laien sind Fadenwürmer mit ihren weltweit mehr als 25 000 Arten zwar kaum zu unterscheiden, für Biologen aber schon. „Neben *Parastrongyloides*, einem engen Verwandten, ist *Strongyloides* der einzige Fadenwurm, bei dem die infektiösen Larven einen für diese Arten typischen sehr langen Schlund haben.

In erster Linie enthalten die Kotproben jedoch andere Fadenwürmer, wie beispielsweise Hakenwürmer, denn Mensch und Tier sind in Asien häufig mit verschiedenen Wurmparasiten infiziert. Ob sich die unterschiedlichen Parasitenarten im Darm Konkurrenz machen, ist noch unklar. „Sicher ist aber: Würmer können bei einer weiteren Infektion die Neuankommlinge der gleichen Art unterdrücken“, erklärt Streit. „Wie, das weiß man noch nicht, aber es könnte ein Ansatz für künftige Behandlungen sein.“

Um den Tricks der Würmer auf die Schliche zu kommen, hält Streit in Tübingen zwei weitere *Strongyloides*-Arten, die in Ratten beziehungsweise Schafen (im Labor auch in Kaninchen) leben. Zusammen mit der Universität Hohen-

heim, die auf der Schwäbischen Alb eine Tierzucht unterhält, kann er zum Vergleich auch die Population des Schafparasiten in der Natur analysieren.

BEDEUTUNG IN DER TIERMEDIZIN

Im Gegensatz zu parasitischen Fadenwürmern spielt *Strongyloides* für die Tiermedizin keine große Rolle. Anders als *Strongyloides stercoralis* führen andere *Strongyloides*-Arten nicht zu lang andauernden, sich selbst erhaltenden Infektionen. Diese Arten, die auch au-

ßerhalb des Wirtes leben können, eignen sich aber als Studienobjekte für die biologische Grundlagenforschung.

Streit will an den Zwergfadenwürmern auch untersuchen, ob es so etwas wie „Parasitengene“ gibt – also eine Gruppe von Genen, die für diesen Lebensstil notwendig sind. 2016 haben Wissenschaftler das Erbgut von vier verschiedenen *Strongyloides*- und zwei weiteren nahe verwandten Arten entschlüsselt – davon lebt eine gelegentlich parasitisch, eine andere ist frei lebend. Ein Vergleich der Genome ergab, dass die parasitischen Würmer mehr

PARASITEN UND IMMUNSYSTEM

Viele Parasiten dämpfen das Immunsystem ihrer Wirte, damit sie von diesem nicht abgewehrt werden können. Bei lange Zeit bestehenden Wirt-Parasit-Beziehungen kann ein evolutionärer Wettlauf entstehen. So auch beim Menschen, der sein Immunsystem vorbeugend aktiviert, um die dämpfende Wirkung von Darmparasiten auszugleichen.

Dies kann dann zum Problem werden, wenn das Immunsystem dauerhaft unterfordert ist, etwa in Ländern mit hohen Hygienestandards. Wissenschaftler vermuten, dass sich das Immunsystem dann gegen den eigenen Körper wenden kann. Dies könnte erklären, weshalb Autoimmunerkrankungen und Allergien in den Industriestaaten immer weiter zunehmen, in Regionen mit vielen Wurmerkrankungen dagegen kaum ein Problem sind. Auch die Tatsache, dass bei Autoimmunerkrankungen und Allergien Teile des Immunsystems überaktiv sind, die sonst zur Parasitenabwehr eingesetzt werden, deutet darauf hin.

Diese Erkenntnis könnte sich medizinisch nutzen lassen. Manche Wurmarten werden bereits zur Behandlung von Autoimmunerkrankungen wie Rheuma, Asthma, multipler Sklerose oder Morbus Crohn eingesetzt. Größere Studien fehlen aber noch.



Links Den größten Teil der Zeit forscht Adrian Streit in seinem Labor in Tübingen. Aber um die Umweltbedingungen kennenzulernen, unter denen die Zwergfadenwürmer leben, unternimmt er auch Feldstudien – eine willkommene Abwechslung zum Institutsalltag.

Rechte Seite Weltweite Verbreitung von *Strongyloides stercoralis*. Die Karte zeigt, dass die Infektionsraten von Land zu Land stark schwanken: In einigen Ländern können lokal mehr als 70 Prozent der Bevölkerung mit dem Wurm infiziert sein.

» Dank der beiden Lebenszyklen kann ein einziger, sich selbst reproduzierender parasitischer Wurm eine neue Population gründen, ohne die Vorteile der sexuellen Fortpflanzung aufzugeben.

Gene für zwei Proteinfamilien besitzen, die die Immunantwort des Wirts dämpfen, als ihre frei lebenden Verwandten. „Welche Rolle diese Gene für eine parasitische Lebensweise spielen, wissen wir noch nicht“, betont Streit. „Dafür müssten wir die einzelnen Gene ausschalten – nicht ganz einfach bei einem Organismus, der in jeder zweiten Generation in einem Wirt lebt.“

Eine weitere Besonderheit der Würmer besteht darin, dass die frei lebende zweigeschlechtliche Generation ausschließlich weibliche Nachkommen hervorbringt, während die eingeschlechtliche, sich durch Jungfernzeugung fortpflanzende parasitische Generation Männchen und Weibchen produziert. Damit Männchen ohne Vater entstehen können, muss je nach *Strongyloides*-Art ein Chromosom ganz oder teilweise abgebaut werden. Der gezielte Abbau von Erbinformation wird als „Chromatindiminution“ bezeichnet

und ist zuerst beim Pferdespulwurm entdeckt worden. Ein solcher Abbau kommt in der Natur nur selten vor – außer bei Nematoden zum Beispiel auch noch bei Ruderfußkrebsen, Wimperntierchen und Neunaugen.

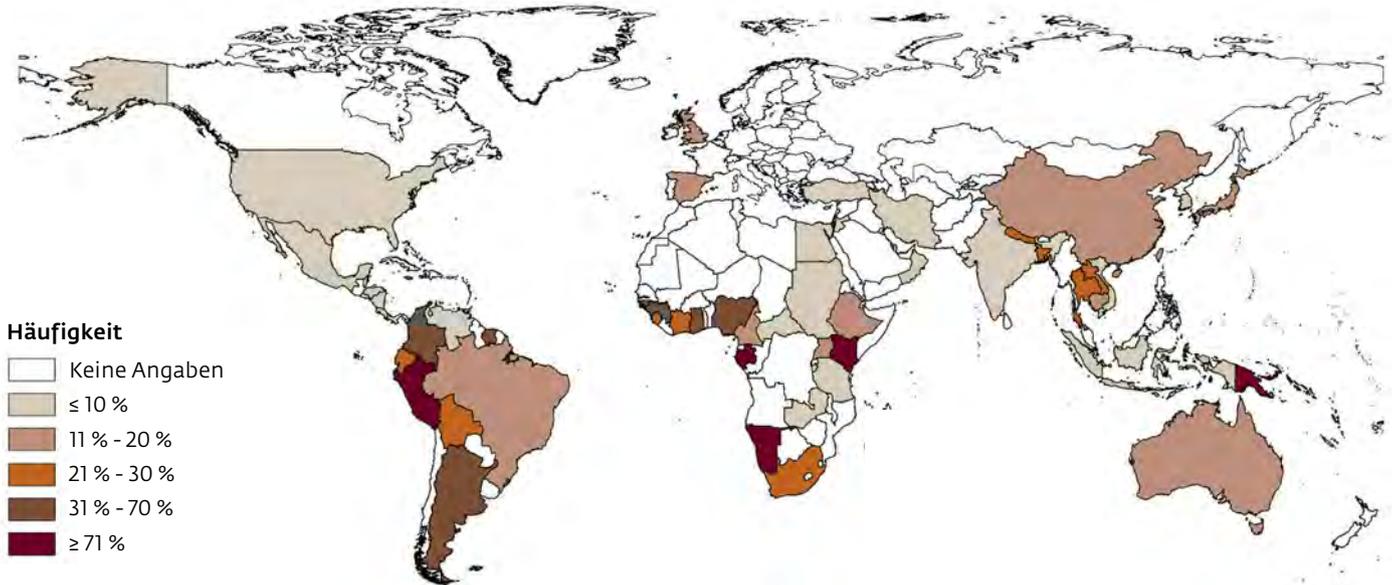
GENERATION OHNE MÄNNCHEN

Verschiedene *Strongyloides*-Arten können offenbar auch auf unterschiedliche Weise verhindern, dass in der Nachkommenschaft der zweigeschlechtlichen, frei lebenden Generation Männchen entstehen. Wie bei vielen Fadenwürmern besitzen auch die Weibchen des Rattenparasiten zwei X-Chromosomen, die Männchen dagegen nur eins. Ein Y-Chromosom, wie beim Menschen, gibt es in diesen Arten nicht.

„Während wir in den Würmern aus Schafen keine reifen Spermien gefunden haben, die zu Männchen führen, gibt es in den Rattenparasiten Spermien

mit und ohne X-Chromosom“, erklärt Streit. Ein Teil dieser Spermien müsste also zu Männchen führen, da eine Eizelle immer ein X-Chromosom trägt. Im Gegensatz zum Schaf gibt es bei der Ratte tatsächlich auch männliche Wurmembryonen. Diese sterben dann aber offensichtlich ab, denn keine der beiden Wurmarten bildet männliche Larven. Wann die männlich determinierten Spermien oder die frühen männlichen Embryonen aussortiert werden, ist jedoch immer noch ein Rätsel.

Warum ist das Leben von Parasiten eigentlich oft so kompliziert? Für Adrian Streit ist der komplexe Lebenszyklus schrittweise aus einem einfacheren entstanden: Viele frei lebende Fadenwürmer bilden gelegentlich Dauerstadien, um schlechte Zeiten zu überstehen. Diese haften sich wie der eingangs erwähnte, auf Käfern lebende Wurm häufig an andere Tiere an. „Sitzt eine solche Larve schon mal auf



einem Tier, ist der Schritt ins Tier hinein nicht mehr so groß. Daraus könnte ein Lebenszyklus wie der von *Strongyloides* entstehen, bei dem der Wurm wahlweise parasitisch oder frei lebt“, erklärt Streit. Die meisten parasitischen Fadenwürmer sind aber in jeder Generation parasitisch. Möglicherweise ist also bei vielen Parasiten im Laufe der Evolution der frei lebende Lebensabschnitt zugunsten eines rein parasitären verloren gegangen.

Strongyloides könnte auf dem Weg dahin sein. Aber ist er dabei vielleicht falsch abgelenkt? Schließlich vermehren sich die Weibchen in ihren Wirten ausschließlich eingeschlechtlich durch Jungfernzeugung. Eine „Verjüngung“ des Erbguts durch Neukombination der Gene findet daher in der parasitischen Generation nicht statt.

Sich ein- oder ungeschlechtlich vermehrende Linien sind, evolutionär gesehen, meist jung. Die Vermutung liegt nahe, dass sie gar nicht alt werden können, weil die Umstellung auf ein Leben ohne sexuelle Fortpflanzung der Anfang vom Ende ist. Möglicherweise hat sich *Strongyloides* also in eine Sackgasse manövriert, sodass er den geschlechtlichen frei lebenden Zyklus gar nicht mehr aufgeben kann.

Vielleicht hat der Wurm ja aber auch für sich eine ideale Lösung gefunden: Dank der beiden Lebenszyklen kann ein einziges, sich selbst reproduzierendes parasitisches Individuum eine neue Population gründen, ohne die Vorteile der sexuellen Fortpflanzung aufzugeben.

Ob und wie *Strongyloides* jemals zum reinen Parasiten werden oder ob sein Lebenszyklus noch komplizierter werden wird, lässt sich heute nicht sicher vorhersagen. Die Evolution findet immer wieder einen neuen, manchmal auch kuriosen Ausweg. ◀

 www.tinyurl.com/yczguvf9

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Es gibt mehr als 50 Arten parasitischer Zwergfadenwürmer, die verschiedenste Landwirbeltiere befallen. Mit dem Wurm *Strongyloides stercoralis* sind weltweit geschätzt 300 Millionen Menschen infiziert.
- Auch Hunde können mit *Strongyloides stercoralis* infiziert sein. Über den Kot der Tiere können die Parasiten den Menschen infizieren. Beim Menschen verläuft die Infektion in der Regel harmlos, bei Personen mit geschwächtem Immunsystem kann sie dagegen tödlich enden.
- Erbgutanalysen haben ergeben, dass parasitische Würmer im Vergleich zu frei lebenden Arten mehr Gene besitzen, die möglicherweise die Immunantwort des Wirts verringern.

GLOSSAR

Jungfernzeugung (Parthenogenese): Bei dieser Form der eingeschlechtlichen Fortpflanzung entstehen Nachkommen aus unbefruchteten Eiern. Diese werden von weiblichen Tieren produziert. Bei der mitotischen Parthenogenese, wie sie bei *Strongyloides* vorkommt, geht der Bildung der diploiden Eizelle keine Reifeteilung (Meiose) voran, und das Erbgut wird nicht durch Rekombination neu gemischt. Es handelt sich dabei also um eine ungeschlechtliche Fortpflanzung, die Nachkommen sind folglich genetisch identisch mit ihrer Mutter.

Dramatischer Rückgang von Orang-Utans

Die Zahl der Menschenaffen auf Borneo ist in den vergangenen 16 Jahren um mehr als 100 000 Tiere gesunken

Das Artensterben auf der Erde geht ungebremst weiter: Die neuesten Daten eines Forscherteams, darunter auch Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, deuten darauf hin, dass sich auf Borneo die Gesamtzahl der Orang-Utans zwischen 1999 und 2015 um mehr als 100 000 Tiere verringert hat. Damit sind auf Borneo nur noch 70 000 bis 100 000 Tiere übrig, von denen aber nur ein Teil in überlebensfähigen Populationen lebt. Verfolgung durch den Menschen ist wahrscheinlich einer der Hauptgründe dafür, dass die Menschenaffen am stärksten in unberührten Gebieten und nachhaltig bewirtschafteten Wäldern zurückgehen. Viele Tiere werden ihres Fleisches und für den Haustierhandel getötet – viele aber auch, um die Ernte vor ihnen zu schützen. Die Zahlen zeigen zwar, dass es noch mehr Orang-Utans gibt als bislang angenommen und dass diese selbst in Palmölplantagen überleben können. Der rasante Rückgang muss aber gestoppt werden, denn aus einer früheren Studie weiß man: Wenn nur einer von 100 ausgewachsenen Orang-Utans pro Jahr aus einer Population entfernt wird, stirbt diese Population sehr wahrscheinlich aus. (www.mpg.de/11938931)



Wilderei und Lebensraumverlust sind die Hauptursachen für das Verschwinden der Orang-Utans. Auf Borneo beispielsweise leben 10 000 Orang-Utans in Wäldern, die in Palmölplantagen umgewandelt werden sollen. Dies würde den Tod der meisten dieser Tiere bedeuten.

Grüne Chemie gegen Malaria

Der Wirkstoff Artemisinin lässt sich nun effizienter, kostengünstiger und umweltfreundlicher produzieren



Im Labor entwickelt, für die großtechnische Produktion geeignet: Die aus Pflanzenabfällen gewonnenen Ausgangsstoffe für die Herstellung von Artemisinin (weißes Pulver) müssen nun nicht mehr gereinigt werden, und als Katalysator genügt das pflanzliche Chlorophyll.

Millionen Menschen vor allem in Entwicklungsländern, die mit Malaria infiziert sind, könnten künftig leichter Zugang zum wichtigsten Wirkstoff gegen die Krankheit erhalten. Bislang sterben jährlich 650 000 Menschen an den Folgen der Malaria, davon fast 600 000 Kinder. Nun gibt es die Chance, viele dieser Todesfälle zu verhindern. Denn Artemisinin, der wesentliche Bestandteil der wirksamsten Medikamente gegen die Infektion, lässt sich jetzt deutlich effizienter, kostengünstiger und umweltschonender als bislang erzeugen. Ermöglicht haben das Forscher der Max-Planck-Institute für Dynamik komplexer technischer Systeme in Magdeburg und für Kolloid- und Grenzflä-

chenforschung in Potsdam, indem sie einen von den Potsdamer Chemikern vor wenigen Jahren vorgestellten Prozess weiterentwickelten. So brauchen sie die Ausgangsstoffe für die Produktion von Artemisinin, die aus Abfällen des Einjährigen Beifußes (*Artemisia annua*) gewonnen werden, jetzt nicht mehr aufwendig zu reinigen. Außerdem setzen sie das Chlorophyll aus der Pflanze als Katalysator ein, sodass sie auf die teuren und umweltschädlichen Fotoaktivatoren verzichten können, die sie dafür bislang benötigten. ArtemiFlow, ein von Max-Planck-Forschern gegründetes Start-up-Unternehmen, arbeitet nun daran, den Prozess industriell umzusetzen. (www.mpg.de/11951749)

Mit dem richtigen Riecher

Studie zeigt kognitive Leistung von Hunden beim Verfolgen einer Geruchsspur

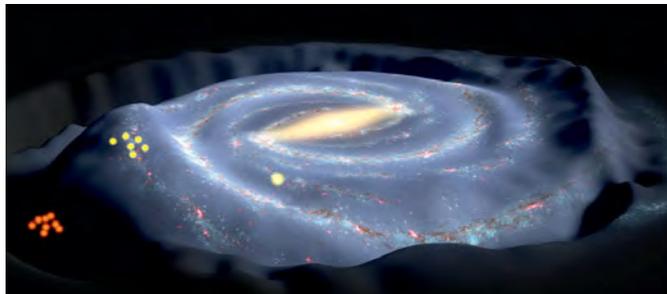
Ob bei der Suche nach Personen oder unterschiedlichen Substanzen – der ausgezeichnete Geruchssinn von Hunden ist allgemein bekannt. Weitgehend unerforscht ist jedoch, wie gut Hunde verstehen, was sie mit ihrem Geruchssinn wahrnehmen. Wissenschaftlerinnen des Max-Planck-Instituts für Menschheitsgeschichte haben daher 48 Hunde einem Test unterzogen: Jeder

Hund folgte insgesamt viermal ohne Begleitung einer Geruchsspur, die mit einem von zwei Lieblingsspielzeugen des Tieres gezogen war. Am Ende der Spur fanden einige der Hunde nicht das Spielzeug, mit dem die Spur gelegt worden war, sondern das andere. Davon wirkten viele der Hunde überrascht, vor allem im ersten Testdurchgang. Obwohl sie das Spielzeug offensichtlich

wahrgenommen hatten, suchten sie weiter. Allerdings verschwand dieser „Überraschungseffekt“ in den nachfolgenden Testdurchgängen. Die Ergebnisse deuten trotzdem darauf hin, dass Hunde, wenn sie eine Spur aufnehmen, eine mentale Repräsentation des Zielobjektes besitzen, das heißt eine konkrete Erwartung haben, was sie am Ziel erwartet. (www.mpg.de/11966356)

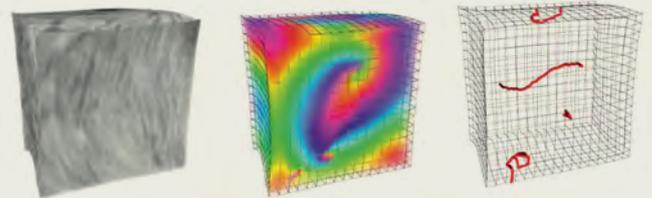
Migration der Sterne

Unsere Milchstraße ist eine durchschnittliche Spiralgalaxie. Die meisten ihrer Sterne umkreisen das Zentrum innerhalb einer Scheibe. Aber auch in der Umgebung, im sogenannten Halo aus dunkler Materie, gibt es welche. Viele Halosterne gruppieren sich in riesigen Strukturen. Diese gelten als Signaturen der turbulenten Vergangenheit unserer Welteninsel – etwa als Trümmer der vielen kleineren Galaxien, die offenbar immer wieder mit unserer Milchstraße kollidierten und dabei auseinandergerissen wurden. Forscher unter Leitung von Maria Bergemann vom Max-Planck-Institut für Astronomie haben zwei Gruppen von Halosterne untersucht und dabei festgestellt, dass ihre chemische Zusammensetzung derjenigen der galaktischen Scheibe ähnelt. Und dies gilt als Beweis dafür, dass die jetzt analysierten Sterne ursprünglich aus dem Inneren der Scheibe stammen und nicht etwa aus eingefangenen Satellitengalaxien. Als Auslöser dieser stellaren Migration vermuten die Wissenschaftler eine Schwingung der gesamten Milchstraßenscheibe; Ursache dafür könnte die Gezeitenwechselwirkung mit einer vorbeiziehenden massereichen Satellitengalaxie gewesen sein. (www.mpg.de/11959740)



Blick auf die Galaxis: Darstellung einer Simulation der Milchstraßenscheibe, gestört durch die Gezeitenwechselwirkung mit einer Zwerggalaxie. Eingezeichnet ist die Lage der von den Forschern untersuchten beiden Strukturen von Halosterne – die Triangulum-Andromeda (Tri-And)- und die A13-Überdichte – oberhalb und unterhalb der Galaxienscheibe.

Wirbelstürme im Herzen

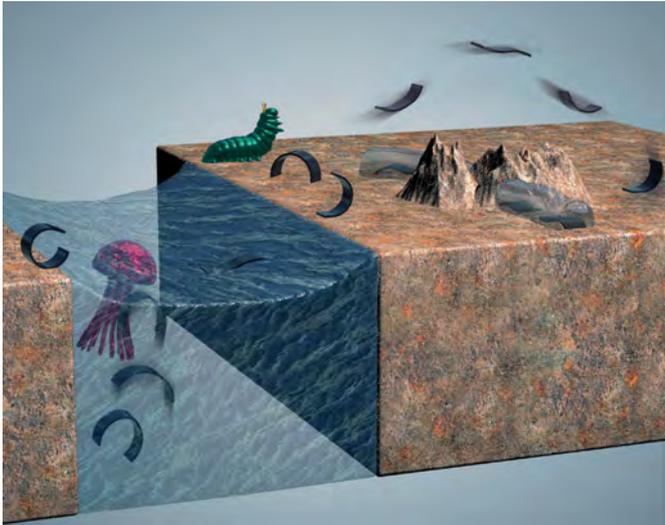


Zum Kern des Kammerflimmerns: Aus Ultraschallbildern (links) rekonstruieren Max-Planck-Forscher, wie der Herzmuskel bei einer Rhythmusstörung wirbelförmig kontrahiert (Mitte). Sie können so auch die Filamente in den Kernen der Wirbel lokalisieren (rechts).

Allein in Deutschland stirbt alle fünf Minuten ein Mensch am plötzlichen Herztod, verursacht durch Kammerflimmern, der häufigsten Todesursache weltweit. Eine neue diagnostische Methode könnte dazu beitragen, dass sich Kammerflimmern und andere Formen von Herzrhythmusstörungen künftig besser behandeln lassen. Ein internationales Team um Physiker und Mediziner des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation sowie des Herzzentrums der Universitätsmedizin Göttingen hat eine Technik entwickelt, um mit gängigen Ultraschallgeräten die wirbelförmigen Kontraktionen, die beim Kammerflimmern den Herzmuskel in Zuckungen versetzen, dreidimensional zu filmen. Sogar die Zentren der Wirbel können die Forscher lokalisieren und verfolgen, wie diese ihre Lage im Muskel verändern. Ein genaues Bild der Wirbelkerne ist eine Voraussetzung, um das Kammerflimmern schonender als derzeit zu beenden. Heute wird diese Form der Herzrhythmusstörungen mit starken und sehr schmerzhaften Elektroschocks von einem Defibrillator behandelt. Manche Patienten mit wiederholt auftretenden Herzrhythmusstörungen lehnen daher die Implantation eines Defibrillators ab, zumal solche Geräte immer wieder ohne Not Stromstöße abgeben. Ließen sich die Elektroschocks an den Wirbelkernen ansetzen, könnten sie deutlich schwächer ausfallen, weil sie dort besonders effektiv wirken. (www.mpg.de/11952269)

Milliroboter mit Bewegungstalent

Ein magnetischer Antrieb ermöglicht es einem winzigen Vehikel, durch eine komplexe Umgebung zu gehen, zu kriechen, zu springen und zu schwimmen



Winzige Roboter brauchen künftig keinen Hindernisparcours mehr zu scheuen. Denn Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme in Stuttgart haben einen vier Millimeter langen elastischen Silikonstreifen entwickelt, der durch unwegsames Terrain laufen, springen, robben und rollen kann. Außerdem kann er kleine Lasten transportieren sowie auf und in einer Flüssigkeit schwimmen. Die verschiedenen Bewegungsformen ermöglichen die Forscher dem Gefährt, indem sie in den Silikonstreifen magnetische Partikel in einer ausgeklügelten Anordnung einbetten. Abhängig von der Orientierung und Stärke eines äußeren Magnetfeldes kann sich der Gummi daher auf unterschiedliche Weise verformen. Den Forschern schwebt vor, dass sich nach dem Vorbild des Bewegungstalents winzige Roboter konstruieren lassen, die im Körper medizinische Aufgaben verrichten. Sie könnten etwa Arzneimittel zu Krankheitsherden transportieren oder kleinere Blutungen stoppen. (www.mpg.de/11891860)

Zu Wasser und zu Lande bewegt sich der Milliroboter, den Stuttgarter Max-Planck-Forscher jetzt vorstellen. Bei der Entwicklung haben sich die Wissenschaftler unter anderem von Quallen und Raupen inspirieren lassen.

Verschaltete Sinneseindrücke

Schätzungsweise bei einem von 25 Menschen tritt Synästhesie auf: eine Kopplung von eigentlich getrennten Sinneswahrnehmungen. Synästhetiker können beispielsweise Klänge sehen, schmecken oder als geometrische Figuren wahrnehmen. Das Phänomen tritt oft mehrfach in bestimmten Familien auf, dürfte also erblich sein. Forscher des Max-Planck-Instituts für Psycholinguistik und der University of Cambridge haben nun die DNA von drei Familien untersucht, in denen generationenübergreifend mehrere Familienmitglieder beim Hören von Klängen Farben sehen. Dabei konnten sie genetische Varianten identifizieren und nachvollziehen, wie diese von einer Generation auf die nächste weitergegeben werden. Zwar unterscheiden sich die auffälligen DNA-Varianten in den drei Familien, aber es gibt auch eine Gemeinsamkeit: eine Anreicherung von Genen, die an der Axonogenese und der Zellmigration beteiligt sind. Die Axonogenese ist ein Schlüsselprozess, der es Gehirnzellen ermöglicht, sich mit den richtigen Partnern zu verschalten. Das deckt sich mit Erkenntnissen aus bildgebenden Untersuchungen, wonach bei erwachsenen Menschen mit Synästhesie die Schaltkreise im Gehirn etwas anders organisiert sind als bei Menschen, die solche Sinnesverknüpfungen nicht erleben. (www.mpg.de/11966178)

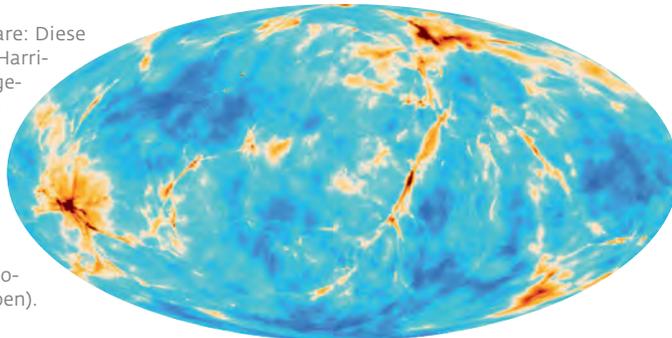
Erreger aus der Kolonialzeit

Nachdem die indigene Bevölkerung Amerikas mit Europäern in Kontakt gekommen war, wüteten immer wieder tödliche Seuchen in der Neuen Welt. Bislang konnten die Ursachen dafür nur unzureichend aus zeitgenössischen Berichten geschlossen werden. Ein internationales Forschungsteam unter maßgeblicher Beteiligung des Max-Planck-Instituts für Menschheitsgeschichte hat erstmals den Erreger einer solchen Epidemie mittels DNA-Analysen mikrobiologisch bestimmt. Das genetische Material entnahmen die Forscher Skeletten von einem Seuchenfriedhof in der aufgegebenen mixtekischen Stadt Teposcolula-Yucundaa in Mexiko. Die dort bestatteten Menschen waren Opfer der sogenannten Cocolitzli-Epidemie, die von 1545 bis 1550 in Guatemala und Mexiko Millionen Menschen das Leben kostete. Das Team analysierte genetisches Material von 29 menschlichen Überresten und verwendete dabei ein neuartiges Computerprogramm, das es ermöglicht, die Proben unspezifisch auf das Erbgut von Bakterien zu untersuchen. So fanden sich in zehn Proben Hinweise auf Bakterien des Typs *Salmonella enterica*, die Paratyphus auslösen – eine Krankheit, die ähnlich wie Typhus zu Fieber, Durchfall und Erbrechen führt. Die Wissenschaftler halten es für möglich, dass der Erreger aus Europa eingeschleppt wurde. (www.mpg.de/11882753)

Relikt des Urknalls

Astrophysiker berechnen das ursprüngliche Magnetfeld in unserer kosmischen Nachbarschaft

Blick auf das Unsichtbare: Diese Himmelskarte zeigt die Harrison-Magnetfeldstärke, gemittelt über eine Kugel von ungefähr 300 Millionen Lichtjahren Radius. Die beiden Regionen mit besonders starken Magnetfeldern sind der Perseus-Pisces-Galaxienhaufen (links) sowie der Virgohaufen (oben).



In den ersten Sekundenbruchteilen nach der Geburt des Universums entstanden nicht nur Elementarteilchen und Strahlung, sondern auch Magnetfelder. Ein Team unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Astrophysik hat nun berechnet, wie diese Magnetfelder in unserer Nähe heute aussehen sollten – mit hoher Detailschärfe und in 3D. Hierfür untersuchten die Forscher zunächst die Verteilung von Galaxien in unserer Umgebung und kalkulierten daraus die Materieverteilung zur Zeit des Urknalls. Jetzt kam der Harrison-Effekt ins Spiel: Dabei erzeugten Wirbelbewegungen im Plasma des frühen Weltalls durch Reibung an dem

damals sehr starken Strahlungsfeld elektrische Ströme und induzierten auf diese Weise magnetische Felder. Anschließend übersetzten die Wissenschaftler diese Felder wieder in die Gegenwart und in unsere kosmische Nachbarschaft und konnten damit Struktur und Morphologie des ursprünglichen Magnetfelds in den umliegenden 300 Millionen Lichtjahren vorhersagen. Leider lässt sich die Theorie nicht durch die Beobachtung testen: Das berechnete Magnetfeld ist um 27 Größenordnungen kleiner als jenes der Erde und liegt damit weit unter der heutigen Messschwelle. (www.mpg.de/11989507)

Gehirne von Jazz- und Klassikpianisten ticken unterschiedlich

Musiker haben ein anderes Gehirn als Nicht-Musiker, denn Musik zu machen erfordert ein kompliziertes Zusammenspiel verschiedener Fähigkeiten, was sich auch in den Hirnstrukturen widerspiegelt. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Kognitionen- und Neurowissenschaften haben nun herausgefunden, dass sogar die Stilrichtung der Musiker eine Rolle spielt: So lassen sich bei Jazzpianisten andere Hirnaktivitäten beobachten als bei klassischen Pianisten, selbst wenn sie das gleiche Musikstück spielen. Ein wesentlicher Unterschied liegt in der Planung von Bewegungen. Zwar müssen Pianisten prinzipiell wissen, was sie spielen, also welche Tasten sie drücken, und wie sie es spielen, also mit welchen Fingern sie diese bedienen. Die Gewichtung dieser beiden Schritte variiert allerdings mit der Musikrichtung. So konzentrieren sich klassische Pianisten besonders auf das „Wie“, also den Fingersatz, um eine Komposition fehlerfrei und einfühlsam zu interpretieren. Jazzpianisten richten ihre Aufmerksamkeit vor allem auf das „Was“, um gut improvisieren zu können. (www.mpg.de/11880107)

Die Wege der Glockenbecher

DNA-Untersuchungen lösen Rätsel um die Verbreitung spezieller Tongefäße im vorgeschichtlichen Europa

Am Übergang zwischen Jungsteinzeit und Bronzezeit nutzten Menschen in West- und Mitteleuropa zunehmend Töpferwaren in einem neuen, glockenförmigen Stil. Ob sich die Glockenbecherkeramik durch Migration oder lediglich durch die Weitergabe neuer Ideen verbreitete, war lange umstritten. Um Klarheit zu gewinnen, hat ein internationales Forschungsteam unter Beteiligung des Max-Planck-Instituts für Menschheitsgeschichte die DNA von 400 vorgeschichtlichen Skeletten analysiert, die Glockenbecher als Grabbeigaben hatten. Demnach können je nach Region beide Erklärungen zutreffen. Zwischen Mitteleuropa und der Iberischen Halbinsel muss sich die Glockenbecherkeramik zunächst ohne nennenswerte Migration verbreitet haben. Denn die DNA der Skelette in den beiden Re-

beliebte Beigabe: Glockenbecher wurden oft Toten mit ins Grab gelegt. Aus der DNA der Skelette können Wissenschaftler heute nachvollziehen, wie sich die Keramik verbreitete.



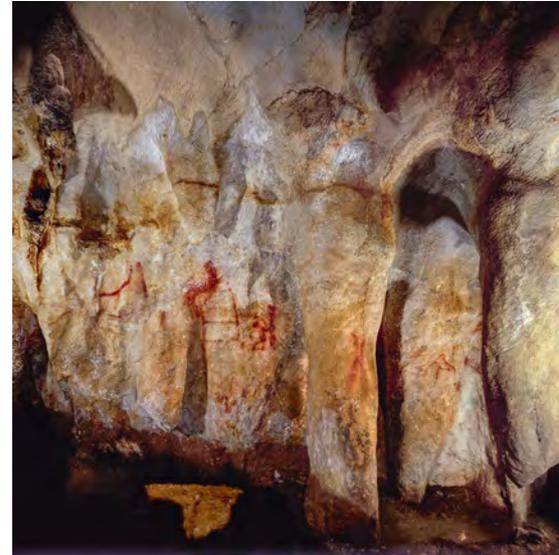
gionen unterscheidet sich deutlich. Anders in Großbritannien: Bei den Toten, die dort mit Glockenbechern bestattet wurden, fand das Forschungsteam Erbmateriale von osteuropäischen Steppenbewohnern, die vor 4500 Jahren über Mitteleuropa auf die Britischen Inseln einwanderten. Sie ersetzten damals in Großbritannien mehr als 90 Prozent der ursprünglichen Bevölkerung. Erst mit den Einwanderern kam die Glockenbecherkeramik in die Region. (www.mpg.de/11952655)

Neandertaler als Künstler

Neue Methode ergibt höheres Alter von Kunstwerken in spanischen Höhlen

Nur den modernen Menschen hielten Anthropologen bislang für fähig, Höhlenmalerei, Figuren, verzierte Knochenwerkzeuge und Schmuck zu erschaffen. Frühere Untersuchungen solcher Funde in Europa hatten ergeben, dass sie vor etwa 40000 Jahren geschaffen worden waren und damit just in der Phase, in der moderne Menschen den Kontinent erstmals besiedelten. Mithilfe einer neuen Messmethode, der sogenannten Uran-Thorium-Datierung, kommt ein internationales Forscherteam, darunter auch Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, nun zu ganz anderen Ergebnissen: Demzufolge haben Neandertaler schon vor über 115000 Jahren symbolische Objekte hergestellt und mehr als 20000 Jahre vor der Ankunft moderner Menschen in Europa Höhlenkunst geschaffen. Die Datierungstechnik basiert auf dem radioaktiven Zerfall von Uranisotopen in Thorium und ermöglicht Al-

tersbestimmungen, die erheblich weiter zurückreichen als die weithin gebräuchliche Radiokarbonmethode. Die Wissenschaftler haben auf diese Weise Kalkkrusten auf Malereien und Muschelschalen mit Farbresten datiert und so das Mindestalter für die Höhlenkunst bestimmt. Die Forscher schließen daraus, dass auch Neandertaler symbolisch denken konnten und kognitiv nicht vom modernen Menschen zu unterscheiden waren. Die Ursprünge von Sprache und menschlichem Wahrnehmungs- und Denkvermögen müssen deshalb auf den letzten gemeinsamen Vorfahren von Neandertalern und modernen Menschen vor mehr als einer halben Million Jahren zurückgehen. (www.mpg.de/11947682)

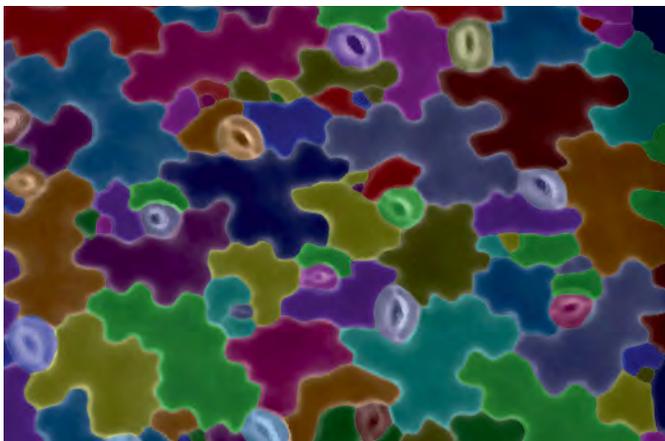


Forscher haben Kalkproben aus drei Höhlen in Spanien analysiert, die sich auf Malereien an den Höhlenwänden gebildet hatten. Die meist roten, manchmal auch schwarzen Gemälde zeigen Tiergruppen, Punkte, geometrische Zeichen und Handabdrücke. Das leiterartige Gemälde aus waagrecht und senkrecht Linien in der Höhle La Pasiega ist den neuen Messungen zufolge mehr als 64000 Jahre alt und muss daher von Neandertalern stammen.

Ein Puzzle aus Pflanzenzellen

Dank ihrer unregelmäßigen Form können Zellen in der Epidermis dem hohen Druck in ihrem Innern standhalten

Pflanzenzellen stehen gewaltig unter Druck. Damit sie nicht platzen, müssen sie sich etwas einfallen lassen: Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Pflanzenzüchtungsforschung in Köln zufolge können Zellen der Epider-



mis mit einer unregelmäßigen Form dem Druck in ihrem Innern besser standhalten als kugelige Zellen. Mit einem eigens entwickelten Computermodell haben die Wissenschaftler die Druckverhältnisse in Zellen mit unterschiedlicher Form simuliert. Die Berechnungen der Kölner Forscher zeigen, dass lange dünne oder unregelmäßig geformte Zellen dem Turgordruck besser standhalten können, weil sie keine großen offenen Bereiche besitzen, die zu Ausbuchtungen neigen. Welche Form die Oberflächenzellen annehmen, hängt vom Wachstum eines Pflanzenorgans ab: Epidermiszellen von Blättern, die gleichförmig in alle Richtungen wachsen, gleichen Puzzleteilen. Pflanzenorgane mit einer bevorzugten Wachstumsrichtung wie zum Beispiel Wurzeln oder Stängel besitzen dagegen meist zylinderförmige Zellen. (www.mpg.de/11956685)

Da die Epidermiszellen der Acker-Schmalwand (*Arabidopsis thaliana*) wie Puzzleteile geformt sind, halten sie größerem Druck stand. Eine Ausnahme bilden die dazwischen eingestreuten Spaltzellen, die dem Wasser- und Gasaustausch der Pflanze dienen. Sie werden durch ihre geringe Größe vor dem Zerbersten bewahrt.

Menschen behindern wandernde Tiere

Biologen stellen Rückgang von Tierbewegungen in menschlich beeinflussten Landschaften fest

Während der Mensch immer häufiger und immer weiter reist, werden Tiere mehr und mehr in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Ornithologie in Radolfzell, der Senckenberg-Gesellschaft und der Universität Frankfurt haben die GPS-Bewegungsdaten von mehr als 800 Tieren ausgewertet und mit dem „Human Footprint Index“ der Gebiete abgeglichen, durch die diese wandern. Demzufolge bewegen sich Säugtiere in Gebieten, die vom Menschen beeinflusst sind, nur ein Drittel bis halb so weit fort wie in freier Wildbahn. Die Tiere werden einerseits durch menschliche Siedlungen und Straßen behindert. Arten wie Rehe und Wildschweine ziehen sich dann zunehmend in kleinere Waldstücke zurück, die von menschlicher Infrastruktur eingekesselt sind. Andere wie zum Beispiel Raufußhühner meiden vom Menschen beeinträchtigte Regionen mit Skianlagen, Seilbahnen und Bergsport gänzlich. Dazu kommt, dass manche Tiere in Anwesenheit des Menschen ihr Verhalten ändern. So finden Stadtfüchse in menschlicher Umgebung schneller Nahrung und müssen daher nur kürzere Strecken zurücklegen. Auch das menschliche Jagd- und Freizeitverhalten wirkt sich auf die Tiere aus: Forschungsergebnisse zeigen, dass Wildschweine und andere Tierarten ihre Aktivitätszeiten und Territorien ändern, um dem Menschen auszuweichen. (www.mpg.de/11892226)

Fotos: Franz Lanting/Fotolia (oben), MPI für molekulare Zellbiologie und Genetik/J. Rink (unten)



Manche Tierarten beanspruchen große Räume und können deshalb nicht mehr in der Nähe des Menschen vorkommen. Zebras zum Beispiel legen auf ihrer jährlichen Wanderung rund 500 Kilometer zurück – so viel wie kein anderes Säugetier Afrikas. Von 1968 bis 2004 blockierte ein Zaun die Wanderung der Tiere im Okavangodelta in Botswana. Erst nachdem das Hindernis entfernt worden war, konnten die Tiere ihre Züge wiederaufnehmen.

Erbgut von Axolotl und Plattwurm entschlüsselt

Die Daten aus den Genomen helfen Forschern, die erstaunliche Regenerationsfähigkeit dieser Tiere zu verstehen



Selbst wenn der Plattwurm *Schmidtea mediterranea* in kleinste Gewebeteile zerschnitten wird, entsteht aus jedem Stück wieder ein vollständiger Mini-Plattwurm. Diese Regenerationsfähigkeit verdankt der Wurm Stammzellen, die zeitlebens aktiv bleiben. Jede einzelne davon kann einen kompletten Wurm bilden.

Verliert der mexikanische Axolotl einen Körperteil, wächst er innerhalb weniger Wochen wieder nach. Der Plattwurm *Schmidtea mediterranea* kann sogar neue Mini-Plattwürmer bilden, wenn er in kleine Gewebeteile zerschnitten wird. Zwei internationale Forscherteams haben nun dank neuer Sequenzieretechniken das Genom der beiden Tiere komplett entschlüsselt – in beiden Fällen mit dabei Forscher des Max-Planck-Instituts für molekulare Zellbiologie und Genetik in Dresden. Das Axolotl-Genom ist mit 32 Milliarden Basenpaaren mehr als zehnmal so groß wie das des Menschen und daher besonders schwer zu sequenzieren. Zudem besteht es aus vielen langen, sich wiederholenden Abschnitten. Aus solchen fast identischen Sequenzen sind

auch große Teile des Plattwurm-Genoms zusammengesetzt – ebenfalls eine große Herausforderung für die Forscher. Im Axolotl-Erbgut entdeckten die Wissenschaftler mehrere Gene, die nur bei Amphibien vorkommen und in regenerierendem Gewebe aktiv sind. Auffallend ist auch, dass ein wichtiges und weit verbreitetes Entwicklungsgen namens PAX3 vollständig fehlt. Der Plattwurm wiederum kommt ohne zwei universelle Gene aus, die während der Zellteilung sicherstellen, dass beide Tochterzellen die gleiche Anzahl an Chromosomen erhalten. Die Forscher wollen mit den neuen Genomdaten untersuchen, warum Axolotl und Plattwurm Organe und Körperteile wiederherstellen können. (www.mpg.de/11885989, www.mpg.de/11885090)

Im Chemielabor des Kosmos

Als junges Mädchen war sie eine begabte Zeichnerin und interessierte sich sehr für Kunst. Die Weichen für ihre Zukunft schienen gestellt. Wäre da nicht ein Buch gewesen – ein Buch, das sie in die Weiten des Weltalls trug und schließlich ihren Berufswunsch entschied: So wurde **Paola Caselli** nicht Künstlerin, sondern Astrochemikerin. Als Direktorin am **Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik** in Garching ist sie immer noch so gefangen von kosmischen Wolken wie damals als Zwölfjährige.

TEXT **ALEXANDER STIRN**

Am Anfang war ein Buch: *Die schwarze Wolke*, ein Science-Fiction-Roman über ein Ungetüm aus Gas und Staub, das sich zur Überraschung von Astronomen als intelligente Lebensform entpuppen sollte. Fred Hoyle, ein ebenso genialer wie umstrittener Astrophysiker, hatte es Ende der 1950er-Jahre geschrieben.

Und Paola Caselli war hin und weg, als sie – im Alter von zwölf Jahren – von ihrer Lehrerin das Buch in die Hand gedrückt bekam. Allein der Gedanke, mit einem Teleskop in die Tiefen des Alls zu blicken, Wolken zu studieren und womöglich Leben zu entdecken, faszinierte die Schülerin. Endlich, dämmerte es Caselli, hatte sie die Aufgabe, ja die Bestimmung gefunden, von der sie geträumt hatte.

40 Jahre später sitzt Caselli in einem hellen, aufgeräumten Eckbüro vor den Toren Münchens. Dunkle, schwarze Wolken sind dennoch allgegenwärtig. Mit den weltweit größten und leistungsfähigsten Teleskopen beobachtet die Italienerin, seit 2014 Direktorin am Max-Planck-Institut für extraterrestrische

Physik in Garching, welche Moleküle in interstellaren Wolken existieren, welche chemischen Prozesse dort ablaufen und wie sich daraus Sterne, Planeten und vielleicht sogar Leben entwickeln könnten. Angetrieben wird Caselli – schwarze Haare, schwarze Brille und ein kaum zu stoppender Redefluss – von einer immensen Neugier. Und von einer geradezu preußischen Disziplin.

EIN BUCH VON FRED HOYLE BESTIMMT DEN LEBENSWEG

„Fred Hoyle war ein Visionär, ein Idol“, sagt Caselli mit einem Strahlen in den Augen, das keine Zweifel daran lässt, welche Faszination sie damals erfasst haben muss – und wie groß diese Begeisterung noch heute ist. „Sein Buch hat mir die Augen geöffnet. Ich habe die Punkte verbunden und wusste: Okay, genau das will ich machen. Ich will die kurze Zeit, die ich in diesem Universum habe, dazu nutzen, es besser zu verstehen.“

Dabei war Hoyles Erstlingswerk, obwohl gespickt mit physikalischen Formeln, nichts anderes als Science-

Fiction. Im Jahr 1957, als der berühmte britische Astrophysiker sein Buch verfasste, kannte man in interstellaren Wolken nur einige wenige einfache organische Moleküle (CN, CH, CH⁺), geschweige denn irgendwie geartete Lebensformen. Das Feld der Astrochemie, auf dem Caselli heute zu Hause ist, existierte noch nicht einmal.

Inzwischen ist die Wissenschaft deutlich weiter. Seit Anfang der 1990er-Jahre bestehen kaum noch Zweifel, dass Moleküle fast überall im Kosmos vorkommen: in den schwarzen Wolken aus Gas und Staub, die sich zwischen den leuchtenden Sternen erstrecken, in unserer Galaxis genauso wie in den Tiefen des Weltalls. Im Labor ist es Chemikern zudem gelungen, die Eigenschaften dieser Moleküle detailliert zu studieren.

Besonders interessant für Astronomen ist, wie sich die Stoffe verhalten, wenn sie durch Strahlung und Kollisionen mit anderen Molekülen angeregt

Zielstrebig: Schon als junges Mädchen ließ sich Paola Caselli vom Universum faszinieren und ging beharrlich ihren Weg in die Wissenschaft. Heute ist sie Direktorin am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.



» Meine Eltern haben mir viel beigebracht, insbesondere, wie man über die Runden kommt. Nur um die Wissenschaft musste ich mich selbst kümmern.

werden, vor allem mit dem im Kosmos am weitesten verbreiteten Molekül, dem des Wasserstoffs (H_2): Moleküle können dann rotieren, vibrieren und elektromagnetische Wellen mit einer genau bekannten Frequenz abgeben. Eine Art leuchtender Fingerabdruck entsteht, der charakteristisch ist für jedes Molekül.

„Diese Fingerabdrücke erlauben es uns, die Physik in den kosmischen Wolken aus großer Entfernung zu untersuchen“, sagt Caselli. Denn obwohl die Wolken dunkel erscheinen und meist nur mit geringer Energie schimmern, sind große Teleskope in der Lage, die charakteristische Strahlung aufzufangen. Die dabei gewonnenen Daten geben den Astrochemikern Aufschluss über die Zusammensetzung der Wolken.

Doch nicht nur das: Die Messwerte verraten auch viel über die Verhältnisse im All. Bewegen sich die Moleküle etwa relativ zur Erde, dann werden die Frequenzen der Fingerabdrücke durch den sogenannten Dopplereffekt leicht verschoben – ähnlich wie sich die Ton-

höhe der Sirene eines Krankenwagens ändert, der mit hoher Geschwindigkeit an einem Menschen vorbeirast. „Kollabiert eine Wolke, wie das vor der Geburt eines Sterns der Fall ist, können wir solche Bewegungen von der Erde aus erkennen“, sagt Paola Caselli.

AMMONIAK DIENT ALS KOSMISCHES THERMOMETER

Moleküle können aber noch mehr. Ein Gas wie Ammoniak verfügt aufgrund seiner Struktur über verschiedene Übergänge. Mehrere Strahlungslinien entstehen, deren relative Intensität von der Umgebungstemperatur abhängt. Astrochemiker nutzen Ammoniak daher als Thermometer für die fernen Wolken.

Spannend ist auch die chemische Zusammensetzung der kosmischen Strukturen. Ein genauer Blick auf die Signale zeigt, dass die meisten Moleküle, wie von Fred Hoyle prognostiziert, organischer Natur sind: dass sie also aus Kohlenstoff und häufig auch aus Stick-

stoff bestehen – grundlegenden Voraussetzungen für Leben, wie wir es kennen. Manche Moleküle sind sogar nur einen Schritt entfernt von der einfachsten Aminosäure Glycin, einem wichtigen Baustein für Proteine.

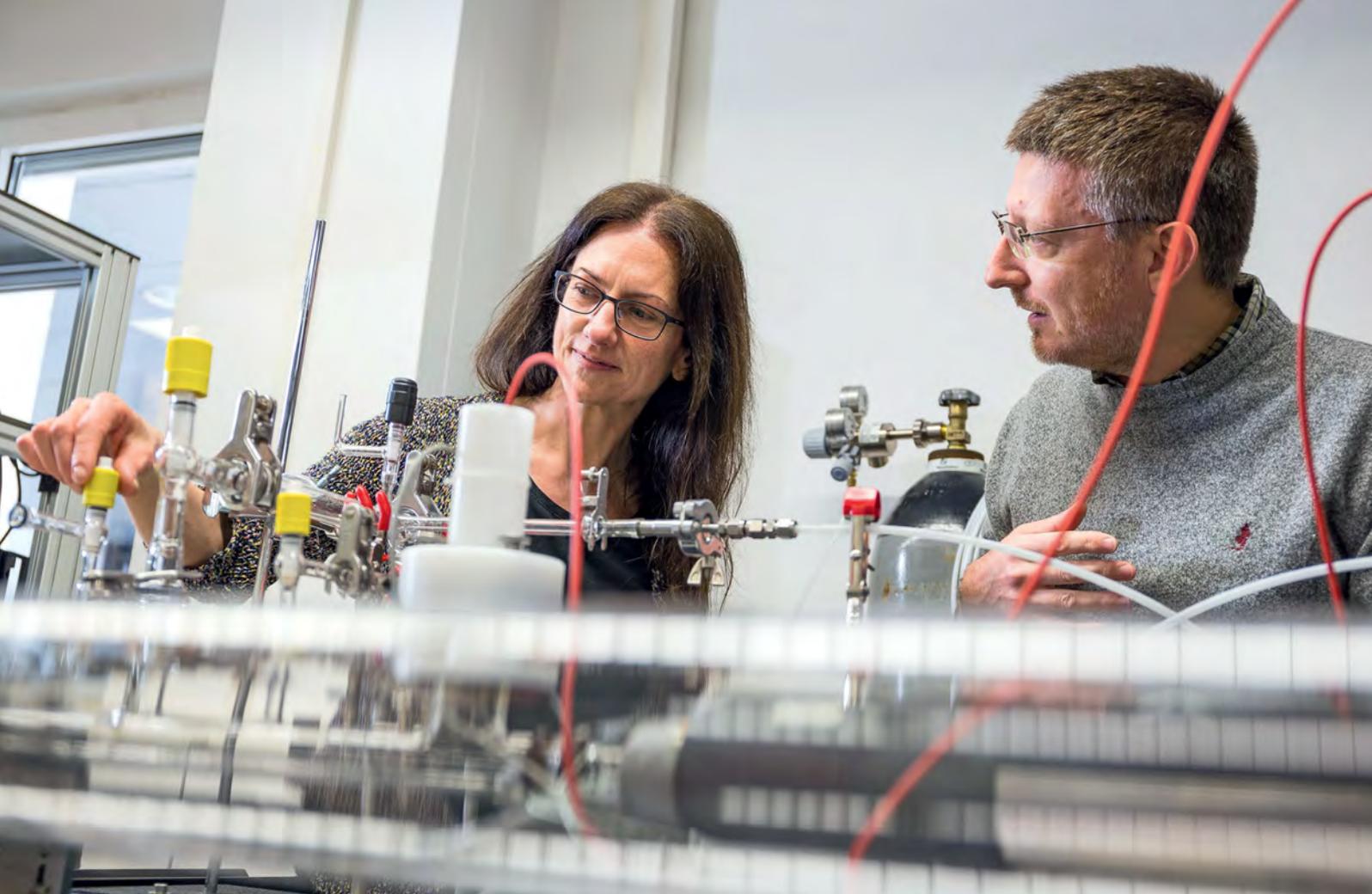
Auch Fettsäuren, die für Zellmembranen gebraucht werden, sowie Nukleinbasen, die Bestandteile unseres Erbguts sind, finden sich im ursprünglichen Material des Sonnensystems. Und Wasser ist sowieso allgegenwärtig. „Im Grunde“, sagt Caselli, „sehen wir dort alles, was wir für eine Zelle, was wir für ein Lebewesen benötigen – sogar noch aus einer Zeit, bevor das Leben auf die Erde kam.“

Im toskanischen Badeort Follonica, in dem Caselli aufwächst, ist all das mindestens so weit entfernt wie die nächsten Sterne und Galaxien. Am exotischsten sind noch die ausländischen Touristen, die auf dem Weg nach Elba, der vorgelagerten Insel, Station in Follonica machen. Casellis Mutter arbeitet dort als Näherin, meist von zu Hause

Wertvolles Werkzeug: Um an Daten zu gelangen und Einblick in kosmische Molekülwolken zu gewinnen, beobachten Paola Caselli und ihr Team an den größten und besten Teleskopen der Erde. Dazu zählen ALMA, ein Verbund von 66 Radioantennen in der chilenischen Atacama-Wüste (links) sowie die 30-Meter-Schüssel auf dem Pico Veleta in Spanien, die von IRAM betrieben wird.



Fotos: Clem & Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com)/ESO / IRAM



Das All im Labor: Es ist nicht so einfach, die Bedingungen kosmischer Gaswolken im Experiment nachzubauen, denn diese Wolken sind im Vergleich zur Erdatmosphäre extrem dünn und sehr kalt. Doch Paola Caselli und ihrem Mitarbeiter Luca Bizzocchi gelingt es, reaktive Moleküle herzustellen und zu untersuchen. Das von diesen ausgestrahlte Licht lässt sich dann wiederum mit Beobachtungen echter Molekülwolken im All vergleichen.

aus, am selben Tisch, an dem die kleine Paola ihre Hausaufgaben macht.

Auch der Vater stammt aus einer nicht mit Wohlstand gesegneten Familie, hat keine Ausbildung, repariert Schuhe, arbeitet in Bars und Geschäften, wird schließlich Friseur – eine Tätigkeit, der Casellis jüngerer Bruder noch heute nachgeht. „Meine Eltern stammen aus einfachen Verhältnissen“, erzählt Paola Caselli. „Sie haben mir viel beigebracht, insbesondere, wie man über die Runden kommt. Nur um die Wissenschaft, um die musste ich mich selbst kümmern.“

Zunächst steht aber die Kunst im Mittelpunkt. Die kleine Paola malt leidenschaftlich gern, hauptsächlich mit Ölfarben. Meist entstehen farbenfrohe Landschaften, Vögel, fast schon mikroskopisch detaillierte Insekten. Später, im Gymnasium, werden daraus präzise Schwarz-Weiß-Bilder, abstrakt, kalligrafisch angehaucht. „Wenn ich malte, habe ich mich völlig in meinen Bildern verloren und erst nach fünf

oder sechs Stunden gemerkt: Oh, ich sollte vielleicht mal etwas essen“, sagt Caselli und lacht.

IM ZENTRUM DUNKLER WOLKEN ENTSTEHEN PROTOSTERNE

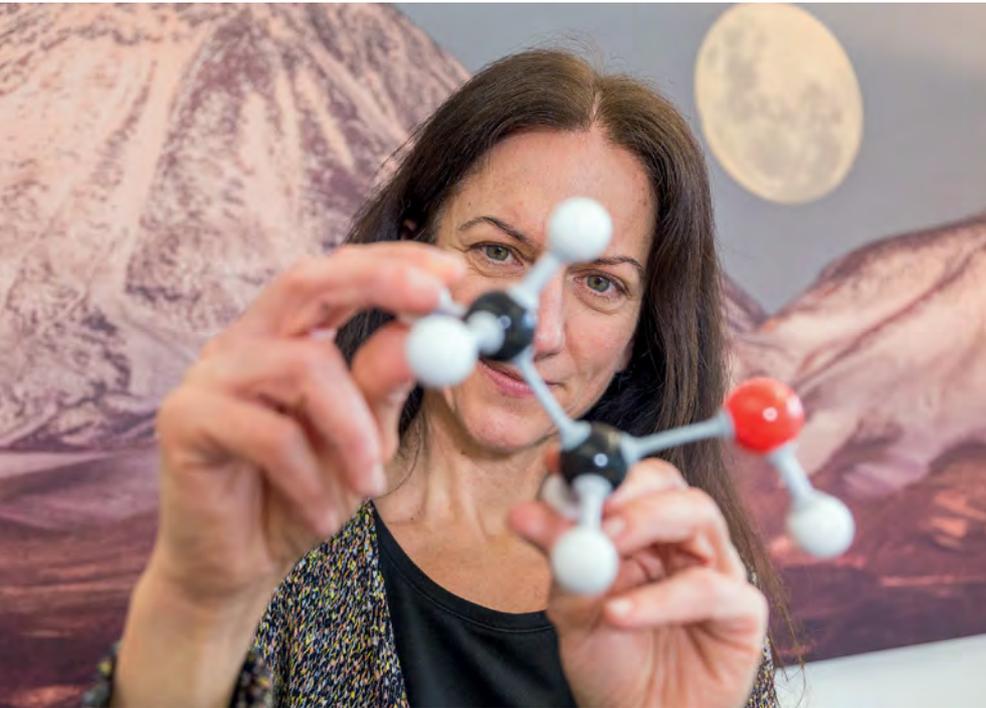
Gegen Ende der Gymnasialzeit – Fred Hoyles Buch hatte längst seine Wirkung entfaltet, die zuvor unschlüssige Schülerin wusste, dass sie Astronomin werden möchte – kommt dann der harte Schritt. „Ich entschied mich, aus Zeitgründen komplett mit der Malerei aufzuhören“, sagt Caselli. „Wenn man etwas machen will, muss man sich dem voll und ganz verschreiben. Oder es bleiben lassen.“

Derzeit liegt der Fokus ganz klar auf der Entstehung von Sternen und Sternensystemen: Im Zentrum dunkler Wolken ballen sich nach und nach die dort vorhandenen Moleküle. Erste zarte Sternstrukturen entstehen, sogenannte Protosterne. Noch sind sie nicht dicht genug, um das nukleare Feuer der Kern-

fusion zu entfachen, das herkömmliche Sterne zum Leuchten bringt. Ihr fahles Licht stammt vielmehr von molekularem Gas und Staub, das sich aufheizt und glimmt, während es auf die frisch geborenen Protosterne prasselt.

Einfach zu verstehen sind die dortigen Verhältnisse und die damit verbundenen chemischen Reaktionen allerdings nicht. Zu Beginn, in den molekularen Wolken, verlieren sich nur ein paar Tausend Moleküle in jedem Kubikzentimeter des Weltraums. Am Ende, wenn der Protostern entstanden ist, sind es eine Quadrillion Teilchen pro Kubikzentimeter. „Dazwischen müssen wir unheimlich viele physikalische Schritte verstehen“, sagt Caselli.

Doch damit nicht genug: Wie ein Donut umgeben die Reste der ursprünglichen Gas- und Staubwolken die frisch geborenen Sterne. Genau in diesen Regionen können Planeten entstehen – und mit ihnen ganze Sternsysteme. Dabei ereignen sich ähnliche Prozesse, wie sie einst zur Geburt unseres Sonnen-



Blick auf die eigene Geschichte: Im Weltall treiben gigantische Gas- und Staubwolken, die voller Moleküle stecken. Bisher kennen die Astrochemiker rund 150 verschiedene Arten, darunter organische Verbindungen wie Formaldehyd, Ameisensäure oder Methanol. Diese und viele andere Bausteine des Lebens versammelten sich auch in dem Material, aus dem unsere Sonne und die Planeten geboren wurden – und letztlich wir Menschen.

systems geführt haben müssen. Für Caselli ein äußerst spannender Vorgang: „Im Grunde geht es darum, unsere eigene Geschichte zu verstehen“, sagt die Astrochemikerin. Und das alles mithilfe des Lichts ferner Moleküle.

E-MAILS NACH ÜBERSEE AN ZWEI PROFESSOREN

Vor 35 Jahren, als Paola Caselli fertig ist mit dem Gymnasium, als sie sich für die Wissenschaft und gegen die Kunst entschieden hat, steckt die Astrochemie selbst allerdings noch im „Protostern-Stadium“. Sie funkelt nicht, sie ist kaum existent. Caselli geht nach Bologna, an eine der damals einzigen beiden Astronomie fakultäten in Italien. Schnell wird klar, dass sie ihrem Ziel allein mit Astrophysik nicht näher kommen wird. Caselli belegt zusätzlich Chemie, absolviert auch dort die Prüfungen, lernt Leute kennen, mit denen sie noch heute zusammenarbeitet. Das Studium schließt sie im Schnellgang ab. „Da meine Eltern nicht reich waren und mich nicht ewig unterstützen konnten, fühlte ich die Verpflichtung, keine Zeit zu verschwenden“, sagt die Max-Planck-Direktorin.

Für den Master in Astrochemie muss sie allerdings, daran besteht kein Zweifel, ins Ausland. Eines Abends – Caselli arbeitet an einem Teleskop unweit von Bologna, das Wetter ist schlecht, es gibt nichts zu tun – schickt die Studentin zwei E-Mails an amerikanische Professoren. Deren Namen hatte sie in genau jenen astrochemischen Veröffentlichungen entdeckt, die ihr am besten gefielen. „Das waren vielleicht die ersten E-Mails, die ich nach Übersee geschrieben habe“, erinnert sich Caselli. Beide Professoren antworten der italienischen Studentin. Beide laden sie ein.

Paola Caselli geht zunächst nach Ohio, später nach Harvard, wo sie im Alter von 28 Jahren promoviert. Der Familie zuliebe kehrt sie ein Jahr später nach Italien zurück, wo sie eine Dauerstellung als Wissenschaftlerin am Observatorium in Arcetri bekommt. „Das war großartig, denn ich war jetzt tatsächlich nahe bei meiner Familie, und ich hatte wunderbare Kollegen“, erinnert sie sich. Doch es ist auch ein ständiger Kampf um Studierende und um die Finanzierung der Forschung. Also wieder Harvard, schließlich das engli-

sche Leeds, wo ihr ein Lehrstuhl angeboten wird. Das übliche Nomadentum einer Wissenschaftlerin eben.

„Wer forschen will, muss jede Chance annehmen, die geboten wird“, ist Caselli überzeugt. „Keinesfalls darf man Angst davor haben, wieder und wieder umzuziehen.“ Auch nicht, wenn – wie bei Paola Caselli – da eine Tochter ist, die sie seit dem Alter von dreieinhalb Jahren allein großzieht. „Klar ist so etwas manchmal nicht einfach, und man muss sein Leben sehr gut organisieren. Aber Kinder passen sich schnell an eine neue Umgebung an“, sagt die 51-Jährige. „Solange die Eltern glücklich sind mit dem, was sie tun, ist das auch okay für die Kinder.“

Schließlich, im April 2014, geht es dann als Max-Planck-Direktorin nach München. Dort, in Casellis Eckbüro mit Blick auf den Bach, der mitten durchs Garching Institut fließt, hängen keine Bilder farbenprächtiger Nebel oder dunkler Wolken. Stattdessen schmücken großformatige Fotos von Teleskopanlagen die Wände. Es sind die Werkzeuge der Astrochemiker, und Paola Caselli braucht viele von ihnen: Je nachdem, wovon die fernen Mole-



küle angeregt werden – von kosmischer Strahlung, von fahlem Sternenlicht, von gewaltigen Explosionen –, leuchten sie in unterschiedlichen Bereichen des Spektrums: Manche Geheimnisse offenbaren sich mittels Radio- oder kurzer Mikrowellen, andere im infraroten Licht. Und um das Bild zu vervollständigen, werden auch Röntgenteleskope benötigt.

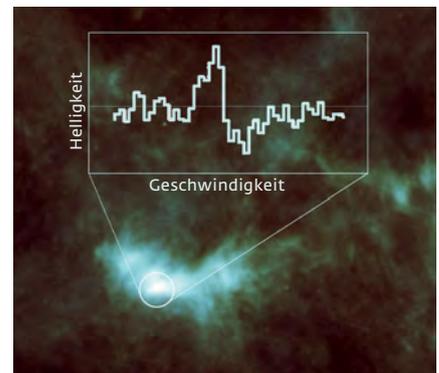
VIRTUELLES RIESENTELESKOP IM COMPUTER

Doch nicht nur ein bunter Mix aus Wellenlängen hilft beim Verständnis der Moleküle und ihrer Bewegungen: Um die Phänomene im Detail zu studieren, schalten die Astrochemiker zudem viele Teleskope zu einem sogenannten Interferometer zusammen. Durch Überlagerung der unterschiedlichen Signale entsteht im Computer ein virtuelles Riesenteleskop mit immenser Auflösung. Der Blick aufs große Ganze geht dabei allerdings verloren, weshalb auch weiterhin einzelne Schüsseln benötigt werden. „Da wir die Wolken nicht anfassen können, ist es extrem wichtig, so viele komplementäre Informationen

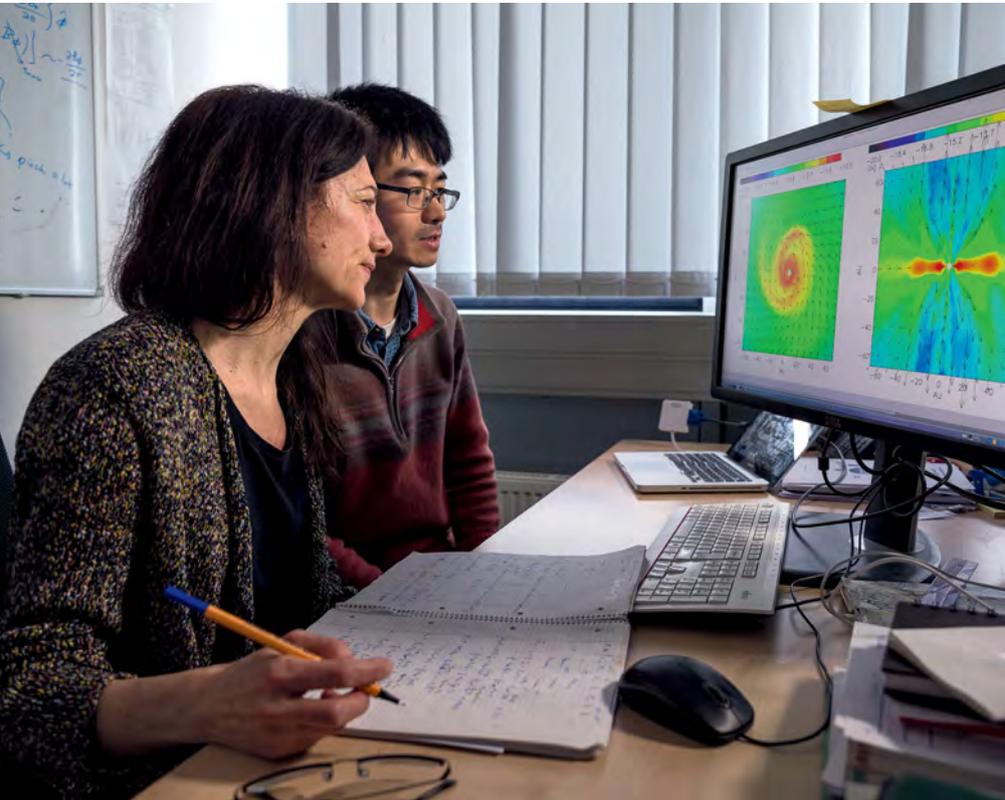
wie möglich zu bekommen“, sagt Caselli. „Das geht nur, wenn wir so viele elektromagnetische Frequenzen wie möglich untersuchen.“

Für Astrochemiker bedeutet das allerdings: Sie sind ständig unterwegs, in ganz unterschiedlichen Winkeln der Erde, etwa in Chile und auf Hawaii. „Das ist mitunter ganz schön hart. Man reist viel, muss die Nacht über aufbleiben und sofort verstehen, was vor sich geht. Schließlich will man keine wertvolle Teleskopzeit verschwenden“, sagt Caselli. Mittlerweile tut sich die Forscherin diesen Stress allerdings nicht mehr an. Sie schickt Studenten und Nachwuchswissenschaftler – damit sie lernen, damit sie die Teleskope besser verstehen, aber auch, damit sie ein bisschen Spaß haben.

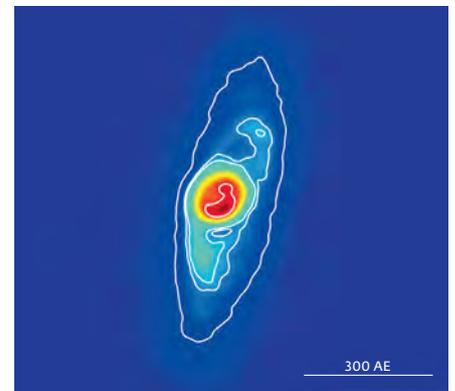
Denn der ist entscheidend: „Zum Wichtigsten für junge Wissenschaftler gehört, motiviert zu sein – verbunden mit der Bereitschaft, wertvolle Zeit für die Wissenschaft zu opfern“, sagt Caselli. Sie selbst habe zum Beispiel zweimal hintereinander an Weihnachten beobachten müssen. Die Italienerin schüttelt den Kopf. „Wer tut sich so etwas an, wenn er nicht über eine gewaltige



Im Kreißaal der Sterne: Der Rho-Ophiuchi-Komplex im Schlangenträger (ganz oben) ist das leuchtende Beispiel für die Geburtsstätte von Sonnen. In solchen Wolken fahnden Forscher wie Paola Caselli nach Molekülen. Das kleinere Bild darunter zeigt den ersten Nachweis von Wasserdampf – dargestellt durch die Spektralkurve – innerhalb der dichten Wolke um einen Stern, der gerade im Entstehen begriffen ist. Die Region trägt den Namen Lynds 1544, liegt in der Konstellation Stier und wurde mit dem Weltraumteleskop *Herschel* im Infrarotlicht aufgenommen. Die Menge des in der Wolke gefundenen Wassers würde etwa 2000 Erdozeane füllen.



Zurück zu den Anfängen: Die Gruppe um Paola Caselli – hier mit Bo Zhao – beschäftigt sich in Theorie und Praxis, am Computer wie am Teleskop, mit dem Ursprung von Sternen und Planeten. Das Foto unten entstand mit dem Radiointerferometer ALMA und zeigt eine junge protoplanetare Scheibe. Sie ist in der größeren Wolke eingebettet, in der sie sich gebildet hat. Ähnlich wie auf diesem Bild sah wohl unser Sonnensystem vor ungefähr 4,6 Milliarden Jahren aus.



Motivation verfügt?“ Noten und Empfehlungsschreiben sind für die Astrochemikerin daher nicht alles: „Die Leute können so klug sein, wie sie wollen, wenn die Begeisterung fehlt, dann wird das nichts.“

DER TAG BEGINNT MIT SPORTLICHEN ÜBUNGEN

Im Auswahlgespräch versucht Caselli daher zu ergründen, ob Interesse für das Forschungsgebiet da ist, ob die Studenten für die Astrochemie brennen. Wenn nicht? Auch nicht schlimm. „Wichtig ist nur, dass die jungen Leute ein Feld finden, an dem ihre Leidenschaft hängt“, sagt sie. „Dann werden sie erfolgreich sein.“

Motivation und Disziplin: Auch an sich selbst stellt Paola Caselli die gleichen hohen Ansprüche. Wenn alles mal wieder etwas viel wird – mit der Arbeit, mit der Tochter, die bald Abitur macht und deren Bild groß auf Casellis aufgeräumtem Schreibtisch steht –,

vertraut die Italienerin auf eine gute Organisation: „Wenn man den Alltag durchplant, ohne lange nachzudenken, dann merkt man gar nicht, wie verrückt das alles ist.“ So gut wie jeder Tag beginnt daher mit Sport: Heimtrainer oder Stepper, auf jeden Fall aber Stretching für den Rücken. Selbst auf Reisen darf die Gymnastikmatte nicht fehlen. Um Zeit zu sparen und weil Caselli ohnehin nicht zum Lesen kommt, laufen dabei Hörbücher.

Auch beim Essen herrscht Disziplin: gesund, nicht zu viel, und vor allem, bitte, schnell. In Italien, erzählt Caselli mit weit ausladenden Gesten, sei oft eine halbe Stunde verplempert worden, bis alle bereit gewesen seien, gemeinsam in die Mensa zu gehen. Hier in Garching breche man zur vereinbarten Zeit auf. Punkt. „Ich mag die deutsche Art, die Ordnung, die Regeln“, sagt Caselli und lacht laut. „Ich mag klare Ansagen.“

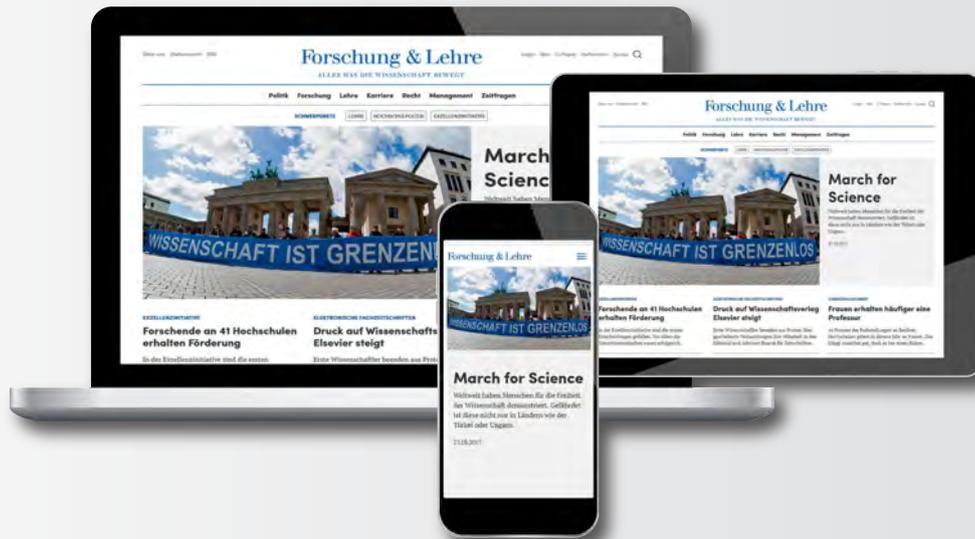
Fred Hoyle, das Idol mit der schwarzen Wolke, war da anders. Der ebenso

geniale wie umstrittene Astrophysiker stellte gern eigene Regeln auf, eigene Thesen. Eine seiner bekanntesten: Simple Lebensformen breiten sich im gesamten Universum aus und sind so auch auf die Erde gekommen. Eine Theorie namens Panspermie. „Ich glaube nicht daran“, sagt Caselli knapp. „Es ist zwar interessant, aber wir brauchen Beweise.“ Sicher sei bisher nur, dass Wasser und organische Moleküle regelmäßig huckepack auf Meteoriten zur Erde kommen. Ob das reicht, ob sich aus diesen im All produzierten Bausteinen Leben erschaffen lässt, will Caselli künftig mit Biophysikern ergründen.

Das wird nicht einfach, und es geht nicht schnell. Es ist, so die Astrochemikerin, ein Puzzle, ein Projekt für künftige Generationen. „Wichtig wird dabei sein, sich nicht in Details zu verlieren“, sagt die Wissenschaftlerin. Denn: „Wir müssen stets die großen Fragen im Kopf behalten, die wir unbedingt beantworten möchten. Nur das hält die Motivation am Leben.“

NEUE WEBSITE

Forschung & Lehre



Die neue Website von Forschung & Lehre, der auflagenstärksten hochschul- und wissenschaftspolitischen Zeitschrift Deutschlands, ist online!

Im modernen und responsiven Design erwarten Sie

- aktuelle Nachrichten
- Hintergrundberichte
- Interviews und Essays

zu Hochschulpolitik, Forschung, Lehre, Karriere, Recht, Management und über gesellschafts- und kulturpolitische Fragen.

Dazu kommen Ratgeber über Karriereperspektiven und Karrierepraxis in Hochschule und Wissenschaft sowie Meldungen über aktuelle Habilitationen und Berufungen.

Das alles jederzeit, tagesaktuell und optimiert für jedes Endgerät.

Mit dem Karriereportal academics bietet Forschung & Lehre darüber hinaus gemeinsam mit der ZEIT einen attraktiven und nutzerzentrierten akademischen Stellenmarkt.

Schauen Sie vorbei auf:

www.forschung-und-lehre.de

Plastik – gut verträglich

Kunststoffe sind praktisch – nicht zuletzt weil sie sehr langlebig sind. Doch wenn sie in die Umwelt gelangen, wird genau das zum Problem: Dort nimmt die Menge an Plastikmüll immer weiter zu. Das Team von **Frederik Wurm** entwickelt am Mainzer **Max-Planck-Institut für Polymerforschung** daher Polymere, die von Mikroorganismen zerlegt werden, sobald sie ihren Zweck erfüllt haben. Die Forscher setzen dabei auf Erfahrungen, die sie mit abbaubaren Polymeren für die Medizin gesammelt haben.

TEXT **KARL HÜBNER**

Jahr für Jahr kommen 380 Millionen Tonnen Kunststoff neu in den Umlauf. Würde man 40-Tonner-Lastwagen damit beladen, wände sich ihre Schlange fast viermal um die Erde. Kunststoffe für Tüten, Lebensmittelverpackungen und Kosmetikfläschchen, Zahncremetuben und Strumpfhosen gehören ebenso dazu wie für das Bildschirmgehäuse von Computer oder Smartphone, die Musik-CD oder den Fußboden aus PVC oder Laminat. Und auch Auto- und Flugzeughersteller erhöhen kontinuierlich den Anteil von Kunststoffen – um Gewicht zu reduzieren und damit Treibstoff zu sparen.

Kunststoffe sind allgegenwärtig, weil sie mit vielen Vorzügen punkten können: Sie sind nicht nur leicht und stabil, sie sind auch sehr vielseitig und langlebig. Chemisch ist für sie kennzeichnend, dass sich bestimmte Grundbausteine, Monomere, zu riesigen Kettenmolekülen aneinanderreihen, manchmal tausendfach. Über die Art der Monomere steuern Chemiker die Eigenschaften der Polymere, etwa ihre Härte, Verformbarkeit, Reißfestigkeit, ihre thermische Beständigkeit und vieles mehr.

Einmal gebildet, sind die meisten Polymere kaum kleinzukriegen. Selbst

Witterung und Licht lassen sie allenfalls vergilben. Und auch Mikroorganismen, die viele andere Materialien als Nahrungsquelle nutzen, können mit den meisten Kunststoffen wenig anfangen. So dauert es, je nach Art des Polymeren und den Umgebungsbedingungen, Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte, ehe die Riesenmoleküle geknackt und vollständig in Kohlendioxid, Wasser und andere Restsubstanzen umgewandelt worden sind. Erst dann wäre aber sichergestellt, dass die Polymere keine Gefahr mehr etwa für Fische und Seevögel darstellen.

4,9 MILLIARDEN TONNEN KUNSTSTOFFE ALS MÜLL

Und so zählt die Langlebigkeit der Kunststoffe zwar bei vielen Einsatzgebieten zu ihren Vorteilen, gilt heute aber zugleich auch als ihr größter Nachteil. So veröffentlichten Forscher aus den USA erst vor knapp einem Jahr erschreckende Zahlen zum Verbleib des Plastiks. Zwischen 1950 und 2015 seien weltweit 8,3 Milliarden Tonnen Kunststoff produziert worden, so ihre Kalkulation. Davon seien 6,3 Milliarden Tonnen bereits wieder zu Abfall

Leichte Kost für Einzeller: Mikroorganismen können solche Polymerplatten auf Phosphatbasis abbauen – derartige Kunststoffe würden sich nicht in der Umwelt ansammeln.





Kaum kleinzukriegen: Plastikmüll kann Jahrhunderte überdauern. Wenn er wie hier auf den Malediven in einer Deponie landet, dann ist es schon gut gelaufen. Denn vor allem in Ländern ohne funktionierende Abfallentsorgung gelangen gewaltige Mengen an Kunststoffen in der Umwelt.

geworden. Von dieser Menge wiederum sei aber nur gut ein Fünftel wiederverwertet oder verbrannt worden. Die übrigen 4,9 Milliarden Tonnen seien als Müll irgendwo auf Deponien oder direkt in der Umwelt gelandet. Die entsprechende Lkw-Kette würde fast 50-mal um die Erde reichen.

Zwar gibt es auch biologisch recht gut abbaubare Kunststoffe, aber ihr Anteil an der gesamten Plastikmenge ist derzeit noch sehr gering. Polymilchsäure etwa findet zwar Einsatz bei Beuteln für Kompostabfälle oder in Partygeschirr für Straßenfeste. Aber um am Ende wirklich abgebaut zu werden, muss das Material auch richtig entsorgt werden. „Wenn die Bierbecher aus Polymilchsäure am Ende im normalen Abfall oder im gelben Sack landen, ist nicht viel gewonnen“, sagt Frederik Wurm, Leiter einer Forschungsgruppe in der Abteilung von Katharina Landfester am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. Nur über die Biotonne oder den Kompost gelange die Polymilchsäure dorthin, wo Mikroorganismen sie auch zerlegen können.

Frederik Wurm und seine Mitarbeiter entwickeln Polymere mit maßgeschneiderten Eigenschaften. Eine davon ist die biologische Abbaubarkeit. Dabei müssten übrigens nicht zwangsläufig nachwachsende Rohstoffe im Spiel sein, räumt der Chemiker direkt mit einem verbreiteten Irrtum auf: „Erstens ist nicht alles, was biobasiert ist, automatisch biologisch abbaubar“, so Wurm. „Und zweitens muss nicht alles, was am Ende abbaubar ist, biologischer Herkunft sein.“ Seine Gruppe etwa setzt derzeit vor allem auf Phosphate und Phosphonate. Und obwohl deren chemischer Ursprung in bestimmten Gesteinen liegt, lassen sich daraus gewonnene Polymere biologisch abbauen.

PE-MOLEKÜLE MIT EINGEBAUTEN SPALTSTELLEN

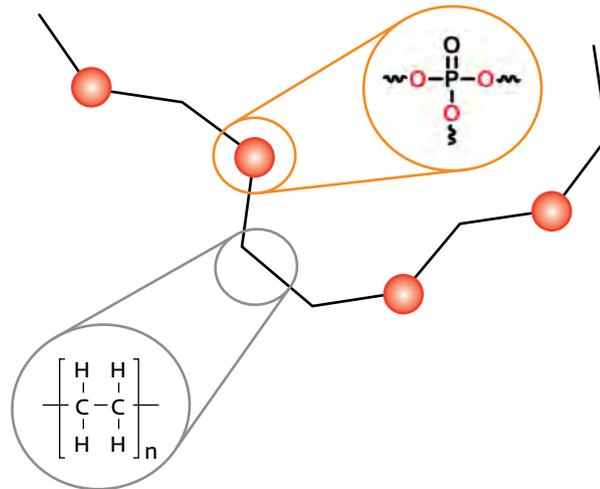
„Die Idee ist eigentlich ganz einfach“, sagt der Chemiker zu einem der aktuellen Projekte. „Wir machen normale PE-Moleküle, in die wir ein paar Phosphatgruppen als Spaltstellen einbauen.“ PE steht für Polyethylen, einen der verbreitetsten Kunststoffe überhaupt. Aus ihm werden Folien für Lebensmittel und die Landwirtschaft ebenso gefertigt wie Einkaufstüten oder Flaschen für Shampoo, Reinigungsmittel oder Kosmetik.

Phosphatbausteine in den PE-Ketten wecken den Appetit bestimmter Mikroben, weil sie ihnen Punkte zum Anbei-

ßen bieten. Ein PE-Molekül mit eingebauten Phosphatgruppen würde in der Umwelt daher leicht gespalten. Zurück blieben die vielen kleinen PE-Abschnitte, die sich im Polymer jeweils zwischen zwei Phosphatgruppen befanden. Sind diese kurz genug, seien auch sie – im Gegensatz zu den riesigen Ketten im normalen Polyethylen – gut abbaubar, so Frederik Wurm.

Bleibt die Frage, ob der Einbau der Phosphate die anderen Eigenschaften des Polyethylens verändert. „Wir wollen hier natürlich Materialien machen, die sich wie PE nutzen lassen – und zusätzlich eben noch abbaubar sind“, so Wurm. Entscheidend sind dabei vor allem die mechanischen Eigenschaften. Und für diese ist ausschlaggebend, wie sich die Polymerketten zueinander anordnen. Von reinem PE beispielsweise weiß man, dass die langen Moleküle sich wie der Balg eines Akkordeons auf-falten. Die Mainzer Chemiker stellten sich also die Frage, ob sich auch das Polymer mit den Phosphatgruppen so verhält. Im Hinblick auf die angestrebte Abbaubarkeit war für die Forscher noch etwas wichtig: „Die Phosphatabschnitte müssen gerade an den äußeren Knickstellen liegen, damit sie für Mikroorganismen und deren Enzyme zugänglich sind“, so Wurm.

Dass ihre beiden Wünsche erfüllt wurden, sahen die Wissenschaftler im Transmissions-Elektronenmikroskop.



Oben In gewöhnlichem Polyethylen wiederholen sich tausendfach Einheiten, die nur aus Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) bestehen. Um den Kunststoff biologisch abbaubar zu machen, fügen die Mainzer Chemiker an den Knickpunkten des Polymers Phosphatbausteine ein – chemische Gruppen aus Phosphor (P) und Sauerstoff (O).

Unten In der Gruppe von Frederik Wurm (rechts) entwickelt Hisachi Tee mithilfe der Phosphorchemie neue Polymere. Die Forscher versuchen auch, Eigenschaften von gängigen Kunststofffolien nachzuahmen.

Demnach fächerten sich ihre Polymere genauso auf wie reines Polyethylen. Und die Phosphatgruppen saßen, wie gehofft, an den Knickstellen.

Noch sind die Mainzer allerdings nicht ganz zufrieden. „Für die meisten praktischen Einsatzgebiete reicht unser Molekulargewicht noch nicht aus“, räumt Wurm ein. Mit anderen Worten: Noch sind die Molekülketten, die die Chemiker im Labor erzeugen, nicht so lang wie sonst bei PE üblich.

Das liegt daran, dass sie ihr Polymer für den Einbau der Phosphatgruppen anders herstellen, als die Industrie Polyethylen produziert.

FÜR DEN ÖKOLOGISCHEN NUTZEN ETWAS MEHR ZAHLEN

Aber immerhin: Einen prinzipiellen Ansatz für abbaubare PE-Materialien haben die Mainzer damit schon in der Schublade. Frederik Wurm weiß natürlich, dass nicht alle PE-Verwender sofort auf das PE-Phosphat-Polymer umstellen werden. Reines PE ist derzeit schließlich konkurrenzlos günstig. Die wenigsten Hersteller können sich da Mehrkosten erlauben und diese an ihre Kunden weitergeben – vor allem wenn es um Massenprodukte wie Verpackungen geht. Frederik Wurm kann sich aber vorstellen, dass manche Kunden vielleicht doch bereit wären, für den ökologischen Nutzen etwas mehr zu zahlen. Etwa solche, die in Bioläden oder anderen einschlägigen Ladenketten einkaufen.

Praktisch gar keine Rolle spielen die Materialkosten dagegen bei medizinischen Anwendungen. Und genau dafür hatte Frederik Wurms Team auch die ersten abbaubaren Polymere auf Phosphatbasis entwickelt. Weil die Chemiker dabei so erfolgreich waren, sind sie überhaupt erst auf die Idee gekommen, Phosphatbausteine auch in gängige Kunststoffe wie PE einzubauen. >

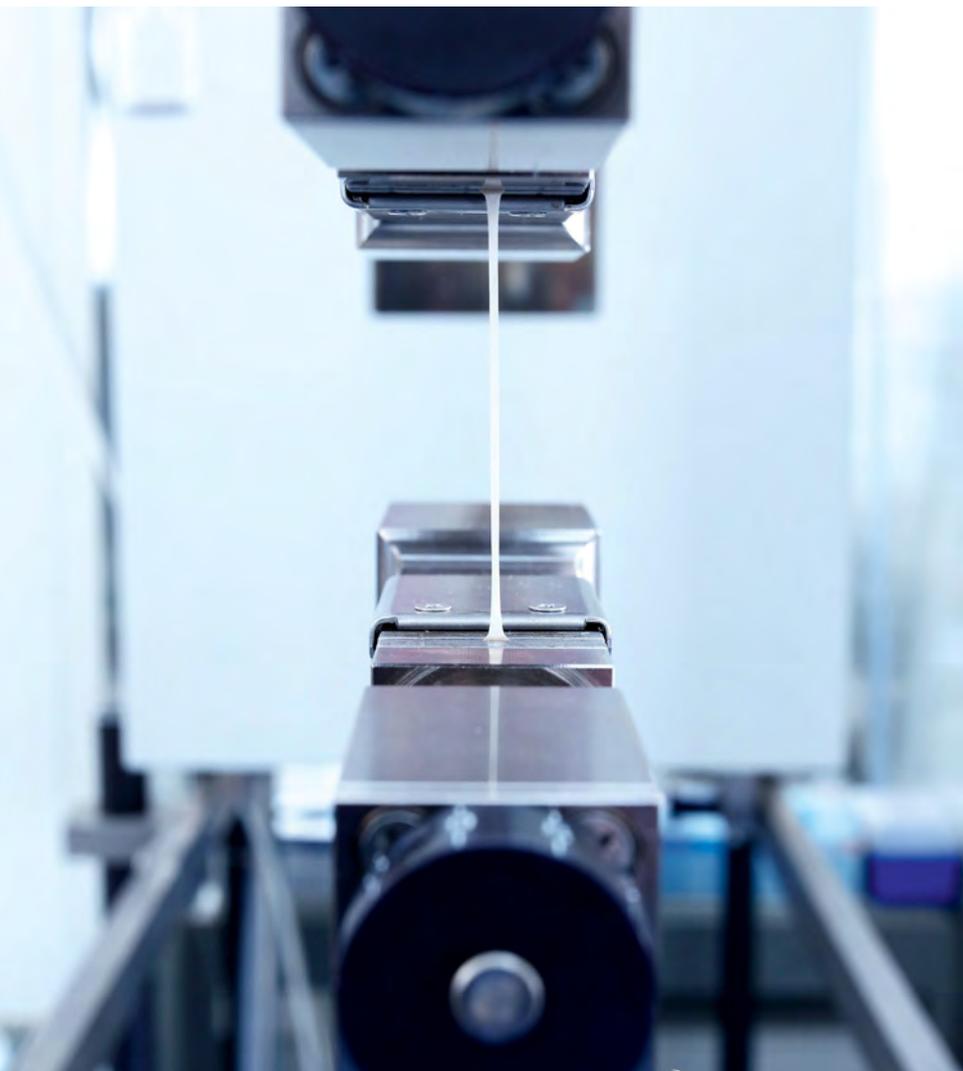




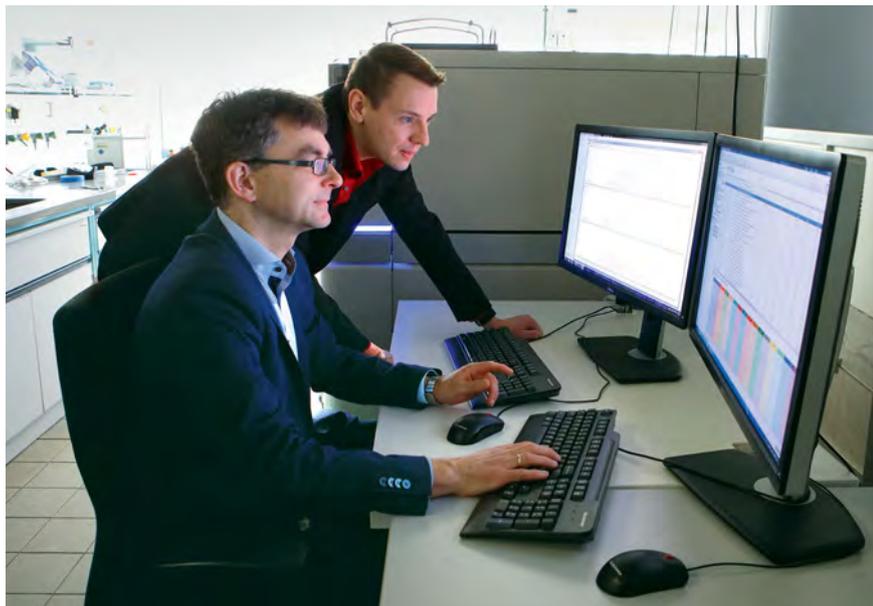
Bei medizinischen Anwendungen geht es vor allem um sogenannte Polymer-Wirkstoff-Konjugate: Darin werden Wirkstoffe, etwa solche gegen einen Tumor, zunächst meist in Nanopartikel eingebettet. Die Teilchen, aber manchmal auch die Wirkstoffe selbst werden dann mit zahllosen Ketten aus Polyethylenglykol (PEG) eingehüllt, die wie Fransen um das Konjugat herumflattern. Diese Ketten wirken wie eine Tarnkappe, die das Vehikel für die Immunabwehr unsichtbar macht und dessen vorzeitigen Abbau auf diese Weise verhindert. Daher zirkulieren die Konjugate deutlich länger im Blut als der reine Wirkstoff. Damit erhöht sich zugleich dessen Wirkdauer.

Zudem sind die meisten Konjugate chemisch so programmiert, dass sie den Arzneistoff gezielt zu bestimmten Zellen bringen. So wird dessen gewünschte Wirkung verstärkt, während sich Nebenwirkungen eindämmen lassen.

„Solche Konjugate sind bereits ein Milliardenmarkt“, sagt Frederik Wurm. Allerdings sei derzeit noch nicht ganz geklärt, was mit den PEG-Einheiten langfristig geschieht. Im Organismus gelten sie als nicht abbaubar, was auch gut sei, so der Chemiker, da der Einzelbaustein, Ethylenglykol, gesundheitlich nicht unbedenklich sei. „Wenn die PEG-Ketten kurz genug sind, werden sie über die Niere ausgeschieden“, sagt Wurm. Von längeren Ketten müsste



Polymere für den Prüfstand: In einem Reaktionsgefäß, das im Wasserbad erhitzt wird, lassen die Max-Planck-Forscher Monomere, die sie über die türkisfarbenen Spritzen hinzufügen, polymerisieren (oben). Wie dehnbar ihre Kunststoffe sind, testen sie in Zugexperimenten (unten).



Enthüllter Tarnkappeneffekt: Volker Mailänder (links) und Frederik Wurm haben durch die Analyse von Daten der Massenspektrometrie herausgefunden, dass sich an ihre winzigen medizinischen Wirkstofftransporter körpereigene Proteine anlagern. Die Immunabwehr erkennt die Frachter deshalb nicht als Fremdkörper.

aktuelles Ziel der Forscher sind Frachter, die einen Wirkstoff zu Immunzellen liefern. Die Substanz soll diese dann so umprogrammieren, dass sie sich für einen Angriff auf Zellen des schwarzen Hautkrebses eignen.

Doch ehe PEEP auch in der medizinischen Praxis überhaupt zum Einsatz kommt, gilt es für Wurm und Mailänder, noch eine Reihe von Fragen zu beantworten. Zum Beispiel, ob Polymere wie PEEP auch den Tarnkappeneffekt gewährleisten, sodass Polymer-Wirkstoff-Konjugate im Blutstrom unbehelligt ihr Ziel erreichen. Testweise haben die Forscher stellvertretend für spätere Wirkstoffeinheiten Nanotransporter kreiert – kleine Partikel, an die sie dann ihre PEEP-Fransen gekoppelt haben. „Damit konnten wir schon zeigen, dass auch diese lange im Blut zirkulieren, also nicht von Zellen des Immunsystems attackiert werden“, sagt Wurm.

Mithilfe einer besonderen Variante der Massenspektrometrie haben die Mainzer Wissenschaftler mittlerweile auch geklärt, worauf der Tarnkappeneffekt eigentlich beruht. „Die Polymerketten, egal ob PEG oder PEEP, rekrutieren aus dem Blut bestimmte Proteine, die sich an das Konstrukt anlagern“, erklärt Mailänder. Diese Hülle aus körpereigenen Eiweißen verleiht den Konjugaten eine Art Freifahrtschein, mit dem sie ungehindert zirkulieren. >

man allerdings annehmen, dass sie sich im Körper anreichern. Wenn es sich um ein Medikament für chronische Krankheiten handele, könne das ein potenzielles Problem darstellen. Denkbar sei etwa, dass PEG-Ketten an bestimmten Stellen im Körper Kristalle bilden.

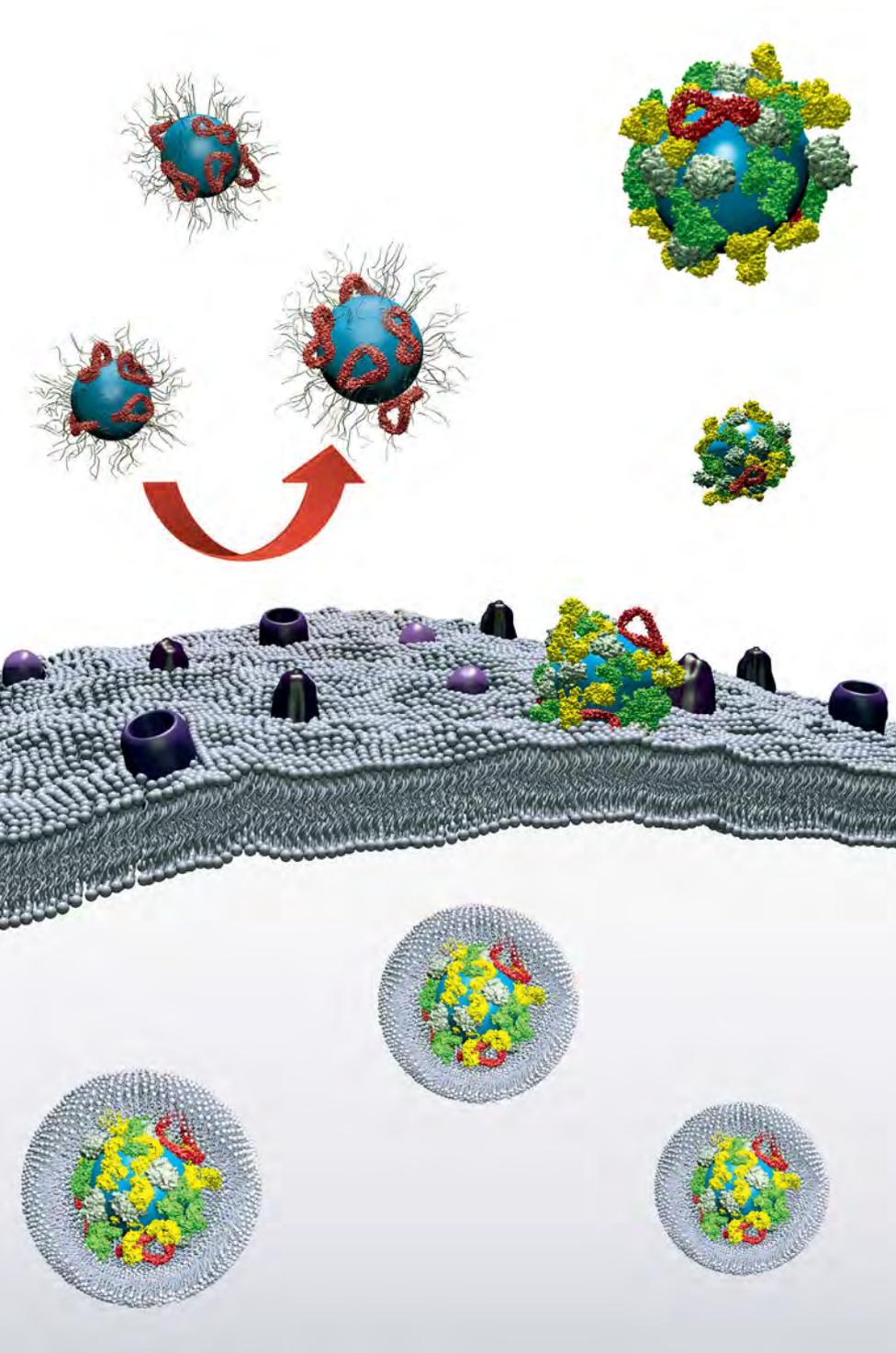
POLYPHOSPHATE WERDEN IM ORGANISMUS ZERLEGT

Derzeit untersucht Frederik Wurm in einer Kooperation mit der Unimedizin Mainz, ob die phosphorbasieren Polymere eine Alternative zum Polyethylenglykol bieten können. Anders als beim PE, in dem die Chemiker das Phosphat nur vereinzelt in die Ketten einfügen, setzen sie hier auf Polymere, die fast ausschließlich aus Phosphateinheiten aufgebaut sind. „Von den Polyphosphaten wissen wir ganz sicher, dass sie im Organismus von Enzymen in Phosphate zerlegt werden können, die dann unproblematisch sind“, erklärt Frederik Wurm, warum sich gerade diese Substanzen gut für medizinische Polymere eignen. Als ein in puncto Wasser- und damit Blutlöslichkeit sowie Abbaubarkeit besonders geeignetes Polyphosphat

hat sich dabei Polyethylethylenphosphat, kurz PEEP, erwiesen. Für dieses Polymer hat Frederik Wurms Gruppe auch schon einen trickreichen Syntheseweg entwickelt.

Anders als im Polyethylen, wo sich die Ethyleneinheiten endlos aneinanderreihen, befindet sich im PEEP jeder Ethylenbaustein zwischen einem Phosphor- und einem Sauerstoffatom. Enzyme haben es dort viel leichter als bei reinem PE, Bindungen zu knacken. Und so spalten sie, nachdem der Wirkstofftransporter seine Fracht am Zielort abgeliefert hat, mit der Zeit eine Ethylenphosphat-Einheit nach der anderen von den PEEP-Ketten ab. „Diese kleinen Phosphatmoleküle werden problemlos über die Niere ausgeschieden“, so Frederik Wurm.

„Die Abbaubarkeit in Organismen und auch in einzelnen Zellen ist besonders wichtig und macht diese Polymere interessant für die weitere Entwicklung“, betont der klinische Kooperationspartner Volker Mailänder von der Universitätsmedizin in Mainz. Der Arzt forscht derzeit an Möglichkeiten, PEG durch gut abbaubare Polymere zu ersetzen. Und er kooperiert dazu mit Frederik Wurm. Ein



Die Mischung macht's: Wenn sich an Partikel, die mit Polymerfransen getarnt sind, verschiedene Proteine des Körpers anlagern, werden die potenziellen Wirkstofftransporter wie im rechten Teil des Bildes von Zellen aufgenommen und, in Membranen eingehüllt, ins Zellinnere befördert. Ziehen die Teilchen dagegen nur einen Typ von Proteinen an, bleibt ihnen die Zelle verschlossen.

len die Mainzer Forscher noch für weitere Einsatzgebiete nutzen. In einem Projekt mit einem Industriepartner entwickeln sie etwa eine Art Knochenkleber, wie er von Chirurgen unter anderem bei kleineren Reparaturmaßnahmen an Knochen eingesetzt wird. In der medizinischen Praxis dienen aktuell vor allem Acrylsäure-Polymere als Klebstoff für solche Zwecke. Schön wäre ein Kleber, der nach einer gewissen Zeit spurlos verschwindet.

MIT PHOSPHORCHEMIE ZU NEUEN FLAMMSCHUTZMITTELN

Für solch ein Einsatzgebiet muss das Material natürlich eine gewisse Stabilität aufweisen. „Die ersten Materialien, die wir gemacht haben, waren aber brüchig wie kaltes Kerzenwachs“, erinnert sich Wurm schmunzelnd. Die Forscher mussten daher noch mal in die chemische Trickkiste greifen, um ihre Phosphorpolymere zum Knochenkleber weiterzuentwickeln. „Zum einen galt es, das Molekulargewicht hochzubringen“, sagt Wurm. Die Ketten mussten also viel länger werden als die Fransen für das Wirkstoffvehikel, die maximal etwas über hundert Phosphatbausteine enthalten. Zum anderen mussten die Chemiker aber auch in das Design der Seitenketten eingreifen, um den späteren Kleber sowohl elastischer als auch härter zu machen.

Diese Möglichkeiten des Eingreifens sind genau das, was Frederik Wurm an der Phosphorchemie so begeistert. Im Vergleich zum Kohlenstoff, dem klassischen Baustein für Polymere, können Phosphoratome aufgrund ihrer Natur

Mit der langen Verweilzeit im Blut allein ist medizinisch allerdings noch nicht viel gewonnen. Wichtig ist auch das chemische Adressschild, damit die PEEP-Nanotransporter-Konjugate ausgewählte Ziele im Körper erreichen. In der Kooperation mit der Mainzer Uniklinik dienen Zuckergruppen als Zustell-etikett, weil sie sich an ganz bestimmte

Immunzellen heften. Doch noch immer tüfteln die Wissenschaftler an Details. Es sei zum Beispiel gar nicht so leicht, so Wurm, „eine gute Balance zwischen genügend Tarnkappeneffekt einerseits und ausreichender Zielgenauigkeit andererseits zu erreichen“.

Dass Polymere auf Phosphatbasis biologisch so gut abbaubar sind, wol-

eine Bindung mehr eingehen. Das gibt Synthesechemikern wie Wurm mehr Spielraum. Bei den Polyphosphaten etwa lässt sich an die Phosphoratome eine chemische Gruppe mehr anhängen als an die Kohlenstoffatome vergleichbarer Polymere, die auf Kohlenstoff basieren. „Diese Gruppe können wir beliebig so gestalten, wie wir es für eine bestimmte Funktion, also etwa Klebrigkeit, benötigen“, schwärmt Wurm und spricht von einer „riesigen Spielwiese“.

Ihre Fähigkeiten in der Phosphorchemie wollen die Mainzer Max-Planck-Forscher auch einsetzen, um neue Flammenschutzmittel zu entwickeln. Phosphorverbindungen spielen schon heute eine gewisse Rolle als Flammenschutzzusätze, weil sie im Feuer brandhemmende Substanzen freisetzen und selbst lediglich verkohlen. Bisher werden solche Zusätze bestehenden Kunststoffrezepturen in der Regel einfach beigemischt. „Wir arbeiten daran, solche Phosphoreinheiten chemisch direkt in andere Polymere einzubauen und diese so flammgeschützt zu machen“, sagt Wurm.

Der Chemiker räumt allerdings ein, dass diese Lösung dort, wo kostengünstige Kunststoffe gefragt sind, einstweilen wohl nicht zum Zuge kommen könnte, einfach weil sie zu teuer sei. Anders sehe das bei den sogenannten Epoxidharzen und -klebstoffen aus, mit denen etwa Fußböden verklebt werden. Dort könnten die Kunststoffe aus dem Mainzer Labor schon eine Rolle spielen. „Wir untersuchen derzeit, ob wir den Flammenschutz in solchen Produkten verbessern können“, sagt Wurm. Ein Nebeneffekt wäre dabei auch, Bisphenol A zu ersetzen. Diese Substanz ist derzeit noch ein wichtiger Ausgangsstoff für Epoxidharze. Allerdings ist sie umstritten, weil sie gesundheitsschädlich sein kann.

Da auch flammgeschützte Produkte irgendwann ihren Dienst getan haben und auf dem Müll landen, wäre es natürlich schön, wenn sie dann unter

üblichen Umweltbedingungen leicht abbaubar wären. Bisherige Flammenschutzmittel sind das eher nicht und darüber hinaus mitunter sogar toxisch. Vor diesem Hintergrund hätten neue Lösungen auf Basis von Phosphaten oder verwandten Phosphorverbindungen einen gewissen Charme.

VIELE ALTERNATIVEN ZU LANGLEBIGEN KUNSTSTOFFEN

Wie schnell sich ihre Verbindungen wirklich zerlegen lassen, testen die Forscher mit einschlägigen Enzymen, wie sie auch Mikroorganismen in der Umwelt freisetzen. Dazu zählen etwa Lipasen, Proteasen, Depolymerasen, aber auch die auf Phosphorgruppen spezialisierten Phosphatasen und Phospho-

diesterasen. „Wir testen sowohl mit einzelnen Enzymen als auch mit Mischungen“, so Wurm. Und auch ganz realitätsnahe Flüssigkeiten wie Blutplasma oder Schlamm aus Kläranlagen bringt sein Team zum Einsatz.

Frederik Wurm ist sich bewusst, dass die Ansätze seiner Gruppe kaum ausreichen, die gesamte Welt der Kunststoffe zu revolutionieren. Aber sie bieten ein paar Möglichkeiten unter vielen weiteren, die zusammen dafür sorgen könnten, dass Plastik eines Tages kein Umweltproblem mehr darstellt. „Es wird nicht die eine Lösung geben“, sagt Frederik Wurm. Vielmehr erfordere das Problem langlebiger Kunststoffe in der Umwelt viele Alternativen zu den Materialien. Immerhin: Seine Gruppe arbeitet an einigen davon. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Seit 1950 wurden mehr als 8,3 Milliarden Tonnen Kunststoffe produziert. Davon sind inzwischen 4,9 Milliarden Tonnen auf Deponien oder anderweitig in die Umwelt gelangt. Der größte Teil der Materialien ist biologisch schlecht abbaubar.
- Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Polymerforschung entwickeln biologisch abbaubare Polymere. Dabei bauen sie in Polyethylen (PE) Phosphateinheiten ein. Diese bieten Angriffspunkte für Enzyme, die in der Umwelt vorkommen und die Polymermoleküle spalten.
- Auf Basis von Polyphosphaten stellen die Mainzer Forscher zudem Polymere für medizinische Anwendungen her. Sie arbeiten aber auch an abbaubaren Polymeren mit Flammschutz-, Klebe- und anderen Eigenschaften.

GLOSSAR

Massenspektrometrie: Eine Methode, um unbekannte Substanzen zu identifizieren. Große Moleküle wie etwa Polymere werden dabei in oft charakteristische Bruchstücke gespalten, die elektrisch geladen und durch die Ablenkung in einem elektrischen Feld entsprechend ihrem Verhältnis von Masse zu Ladung sortiert und zu einem Spektrum aufgefächert werden.

Polymer: Ein Kettenmolekül, dessen Bausteine (Monomere) manchmal tausendfach aneinandergereiht werden. Bei Polyethylen (PE) werden Ethylenmoleküle miteinander verkettet, bei Polyethylethylenphosphat (PEEP) reihen sich Ethylethylenphosphat-Einheiten aneinander.

Polymer-Wirkstoff-Konjugat heißt ein Konstrukt, in dem ein medizinischer Wirkstoff – meist in einen Nanopartikel eingebettet – zur Tarnung vor dem Immunsystem in Polyethylenglykol (PEG) oder Polyethylethylenphosphat eingehüllt wird. Die Konjugate erhöhen die Verweildauer des Wirkstoffs im Organismus und sind zudem mit chemischen Zustellketten versehen, sodass sie gezielt gewünschte Zellen ansteuern.

Kahlschlag am Klima

In öffentlichen Debatten um die Erderwärmung steht eine Ursache im Mittelpunkt: die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe. Doch der Mensch verändert das Klima auch, indem er Wälder rodet und Ackerbau, Forstwirtschaft sowie Viehzucht betreibt. **Julia Pongratz** untersucht mit ihrer Forschungsgruppe am **Max-Planck-Institut für Meteorologie** in Hamburg die Folgen dieser Aktivitäten für das Klima – und wie sich die Eingriffe nutzen ließen, um dem globalen Wandel entgegenzuwirken.

TEXT UTE KEHSE

Im Büro von Julia Pongratz hängt eine große Weltkarte an der Wand. Die Meere erscheinen dort weiß, die Kontinente bunt. Ein Mosaik aus violetten, grünen, braunen und grauen Farbtönen überzieht die Landflächen. „Diese Karte zeigt die verschiedenen Landnutzungssysteme auf der Erde“, erläutert die Forscherin des Hamburger Max-Planck-Instituts für Meteorologie. Dunkelgrün steht für unberührten Urwald, Hellgrün für Wälder, in denen Forstwirtschaft betrieben wird. Die violetten und pinkfarbenen Töne symbolisieren verschiedene Typen Ackerland, orange Farbtöne Grasland mit unterschiedlich starker Viehwirtschaft. Je heller der Ton, desto stärker nutzen Menschen das Land.

Was man sieht: Die Menschheit hat einen Großteil der Landfläche der Erde in Beschlag genommen. „Drei Viertel der eisfreien Oberfläche sind anthropo-

gen beeinflusst“, sagt Julia Pongratz. Auf etwa einem Viertel der Kontinente haben die Menschen im Laufe der Geschichte die natürliche Vegetation vernichtet, um Äcker, Reisfelder oder Weiden anzulegen. Seit 1950 hat sich diese Entwicklung beschleunigt, die starke Entwaldung in den Tropen zeugt davon. Gut die Hälfte der Oberfläche ist zwar noch vom ursprünglichen Vegetationstyp bedeckt, dennoch findet dort irgendeine Form von Bewirtschaftung statt. Studien zufolge beansprucht der Mensch somit fast ein Viertel der globalen terrestrischen Nettoprimärproduktion, genauer gesagt 24 Prozent der jedes Jahr nachwachsenden pflanzlichen Biomasse.

Die Menschheit, so könnte man es sagen, hat sich den Planeten tatsächlich untertan gemacht. Diese umfassende Ausbeutung der Natur bleibt nicht ohne Folgen für das Klima. So lässt sich



Foto: shutterstock

Wälder mit unterschiedlicher Klimawirkung: Ein unbewirtschafteter Wald mit verschieden alten Bäumen und viel Totholz (diese Seite) tauscht andere Mengen an Treibhausgasen, Wasser und Energie mit der Atmosphäre aus als eine Fichtenmonokultur (links).



– die historische Entwaldung inbegriffen – insgesamt ein Drittel des jemals vom Menschen freigesetzten Kohlendioxids darauf zurückführen, dass die ursprüngliche Vegetation der Landoberfläche verändert wurde. Derzeit verursachen Veränderungen in der Landnutzung etwa zehn Prozent der menschlichen CO₂-Emissionen.

TREIBHAUSGASE AUS DÜNGUNG, VIEHZUCHT UND REISANBAU

Noch größer ist der Effekt, wenn klimawirksame Gase wie Methan oder Lachgas aus der Landwirtschaft in die Bilanz einfließen. Diese Treibhausgase gelangen etwa durch Düngung, Viehzucht oder Reisanbau in die Atmosphäre. „Rechnet man Methan und Lachgas zum Kohlendioxid hinzu, erhöht sich der Anteil der Landnutzung an den heutigen Emissionen von Treibhausgasen auf etwa ein Drittel“, berichtet Julia Pongratz. In der Bilanz einzelner Länder wie etwa Brasiliens spielen die Landnutzungsemissionen sogar eine größere Rolle als fossile Brennstoffe.

Wenn der Mensch etwa Wälder in Äcker umwandelt, greift er aber nicht nur in biogeochemische Kreisläufe wie den Kohlenstoff- oder den Stickstoffkreislauf ein und verändert die CO₂-Bilanz in der Luft. Er beeinflusst damit auch verschiedene biophysikalische

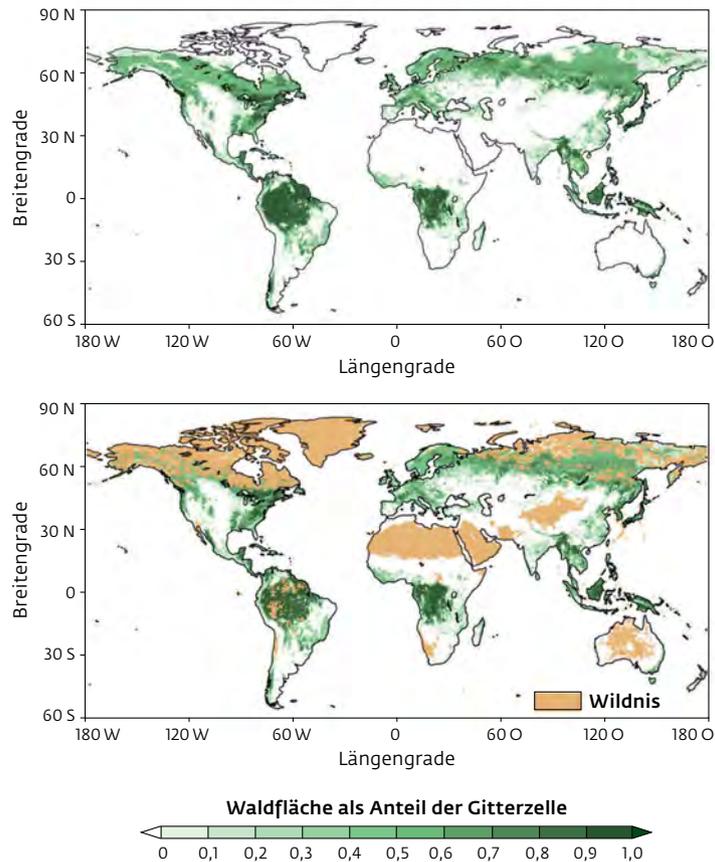
Komplexer Klimafaktor: Wenn ein Wald gerodet wird, verschwindet nicht nur ein Speicher für Kohlendioxid – auch die Albedo und andere physikalische Eigenschaften verändern sich (oben). Wie die Vegetation das Klima beeinflusst, hängt aber prinzipiell auch davon ab, welche Pflanzen auf einem Feld angebaut werden, etwa Mais oder Weizen (Mitte). Die vielfältigen Effekte sollten beispielsweise beim Anbau von Elefantengras als Ersatz für fossile Brennstoffe berücksichtigt werden (unten).

Vorgänge, etwa die Albedo, also den Anteil des reflektierten Sonnenlichtes, oder den Austausch von Wärme und Feuchtigkeit zwischen Land und Atmosphäre. Die biogeophysikalischen Beiträge können zur Erwärmung oder Abkühlung der Atmosphäre führen und so den Klimaeffekt einer steigenden CO₂-Konzentration verstärken oder abschwächen.

Da bei Änderungen der Landnutzung durch Land- und Forstwirtschaft biochemische und physikalische Faktoren auf komplexe Weise zusammenspielen, verstehen Forscher die Klimafolgen solcher Eingriffe bislang wesentlich weniger gut als die Auswirkungen verfeuerter fossiler Energieträger. Die Klimabilanz der verschiedenen Faktoren kann dabei je nach Breitengrad oder Artenzusammensetzung der Vegetation unterschiedlich ausfallen – und sie kann manchmal zu allem Überfluss auch noch lokal und global in verschiedene Richtungen gehen.

Wie kompliziert die Zusammenhänge sind, zeigt ein vergleichsweise einfaches Beispiel – die Umwandlung eines Waldes in ein Getreidefeld. Da gibt es zunächst den Effekt, dass nun weniger Wälder zur Verfügung stehen, die CO₂ aufnehmen und langfristig speichern. Das begünstigt die globale Erwärmung. Doch gleichzeitig wirken die biogeophysikalischen Effekte, und zwar einerseits am Ort der Entwaldung, andererseits aber auch in fernerer Regionen, weil die Änderungen im Wärme- und Wasserhaushalt der Atmosphäre durch Luftströmungen weitergetragen werden.

Die fernen Auswirkungen der biogeophysikalischen Veränderungen hat Johannes Winckler, ein Mathematiker in Julia Pongratz' Gruppe, erstmals klar von den lokalen Effekten getrennt. „Die nicht-lokalen Effekte wurden bislang vernachlässigt, weil sie von Beobach-



Viel Forstwirtschaft: Wald bedeckt große Teile der Tropen und der hohen nördlichen Breiten (oben). Bei nur etwa 40 Prozent dieser Flächen handelt es sich aber um Wildnis, wie die orangenen Gebiete in der Karte unten zeigen.

tungsdaten nicht erfasst wurden“, sagt Winckler. Ihm ist es aber gelungen aufzudröseln, wie sich eine massive Rodung weltweit und vor Ort auswirkt, und hat dabei festgestellt, dass bislang vorgenommene Entwaldungen fernere Regionen abgekühlt haben. Die nicht-lokalen biogeophysikalischen Effekte gleichen also einen Teil der globalen Erwärmung durch die CO₂-Emissionen der Rodung wieder aus.

Für die tatsächlichen Lebensbedingungen ist die globale Mitteltemperatur aber weit weniger relevant als das Klima vor Ort. Und auch vor Ort sind die Klimafolgen einer Entwaldung nicht einfach abzuschätzen. Denn durch den Wechsel der Vegetation wird die Fläche

typischerweise heller, es erhöht sich also die Albedo. Der Kahlschlag wirkt sich somit kühlend aus, weil ein größerer Teil des Sonnenlichts ins All zurückgeworfen wird. Die Abholzung kann aber auch eine wärmende Wirkung entfalten, da sie die Transpiration, also die Verdunstung aus der Blattfläche, reduziert. Denn ein Getreidefeld gibt oft weniger Feuchtigkeit ab als ein Wald, der meistens eine größere Blattfläche und tiefere Wurzeln hat.

Welcher Einfluss überwiegt, hängt vor allem vom Breitengrad ab. In hohen Breiten, also etwa in Nordeuropa, wirkt sich der Albedoeffekt meist stärker aus, sodass eine Abholzung dort eher zu einer lokalen Abkühlung führt. In den



feuchten Tropen dominiert hingegen oft der Transpirationseffekt – dort führt ein Kahlschlag also zur Erwärmung.

KLIMARELEVANTE PROZESSE IN DER FORSTWIRTSCHAFT

„Es ist eine Besonderheit unserer Gruppe, dass wir sowohl die biogeochemischen als auch die biogeophysikalischen Aspekte der Landnutzung betrachten“, berichtet Julia Pongratz. „Das ist wichtig, weil das Klima die beiden Faktoren sieht und beide auch politisch relevant sind.“ Für die gelernte Geografin macht die politische Bedeutung einen besonderen Reiz ihres im Kern auf Grundlagenforschung ausgerichteten Forschungsthemas aus.

Sie und ihr interdisziplinäres Team arbeiten seit der Gründung ihrer Emmy Noether-Gruppe im Juli 2013 daran, klimarelevante biogeophysikalische und biogeochemische Prozesse zu untersuchen, die bei der Landnutzung und insbesondere in der Forstwirtschaft eine Rolle spielen. Überdies will die Gruppe herausfinden, inwieweit sich Landmanagement zum Klimaschutz nutzen lässt. Zu diesem Zweck arbeiten die zehn Forscherinnen und Forscher daran, einige bislang vernachlässigte Prozesse in das Erdsystemmodell MPI-ESM des Hamburger Max-Planck-Instituts einzuarbeiten.

Solche Erdsystemmodelle gehören zu den wichtigsten Werkzeugen der Klimaforscher. Sie können seit Längerem abbilden, was passiert, wenn Wälder beispielsweise Weideflächen oder

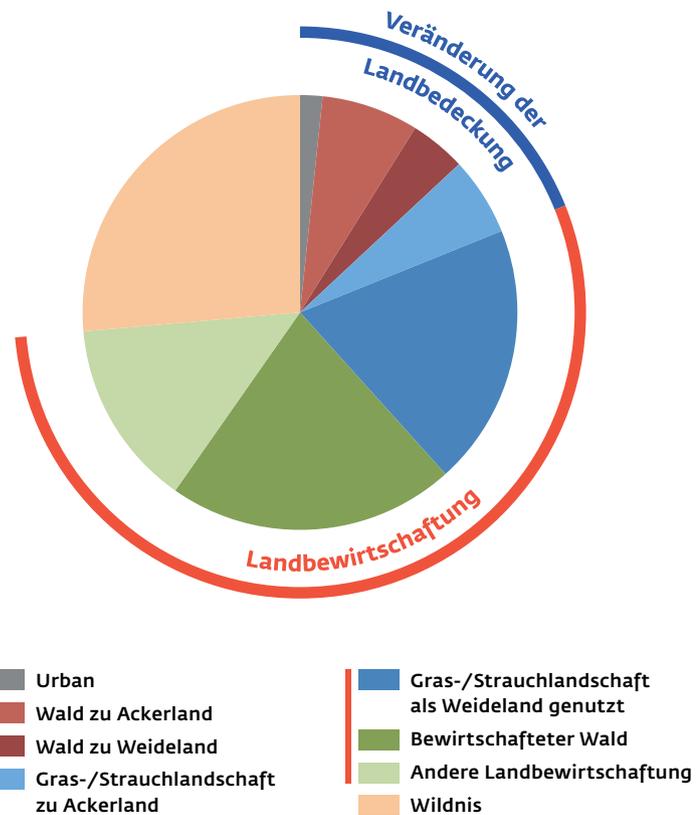
Die Klimaforscher und ihr Werkzeug: Julia Pongratz, Sebastian Sonntag und Julia Nabel (von links) zwischen einigen Türmen des Hochleistungsrechners Mistral am Deutschen Klimarechenzentrum in Hamburg.

Foto: Tom Pingel

Äckern weichen müssen – wenn sich also die Landbedeckung ändert. Den noch häufigeren Fall, dass auf einer Fläche lediglich die Form der Bewirtschaftung wechselt, haben die Modelle dagegen bisher nicht erfasst. Dabei gibt es in der Land- und Forstwirtschaft zahlreiche Variablen, etwa Düngung, Bewässerung, Erntezyklen oder Beweidung. Sie beeinflussen biogeophysikalische und biogeochemische Größen wie die Albedo, die Oberflächenrauigkeit, die Kohlenstoffaufnahme und andere Klimafaktoren. Aus diesem Grund berücksichtigt das Team von Julia Pongratz sowohl Änderungen in der Landnutzung, bei denen sich die Bedeckung der Oberfläche wandelt, als auch solche, die nur die Bewirtschaftung betreffen.

Wie wichtig es wäre, auch einen Wechsel im Landmanagement in Klimamodellen zu berücksichtigen, zeigte 2014 eine Studie von Forschern um Sebastiaan Luyssaert vom französischen Labor für Klima- und Umweltwissenschaften in Gif-sur-Yvette. In der Zeitschrift *NATURE CLIMATE CHANGE* berichtete das Team, zu dem Julia Pongratz gehörte, dass eine Veränderung in der Bewirtschaftung – etwa der Übergang von einem unberührten zu einem bewirtschafteten Wald oder der Anbau verschiedener Feldfrüchte – die Temperatur genauso stark beeinflussen kann wie Wechsel in der Landbedeckung.

An den Standorten, die die Forscher verglichen, riefen beide Prozesse im Durchschnitt eine Erwärmung um zwei Grad Celsius hervor. Die Schlussfolgerung: Bei Strategien zum Klimaschutz sollte es nicht nur um fossile Emissionen und Entwaldung gehen. Auch die Folgen einer in Zukunft wahrscheinlich intensiveren Land- und Forstwirtschaft sollten berücksichtigt werden.



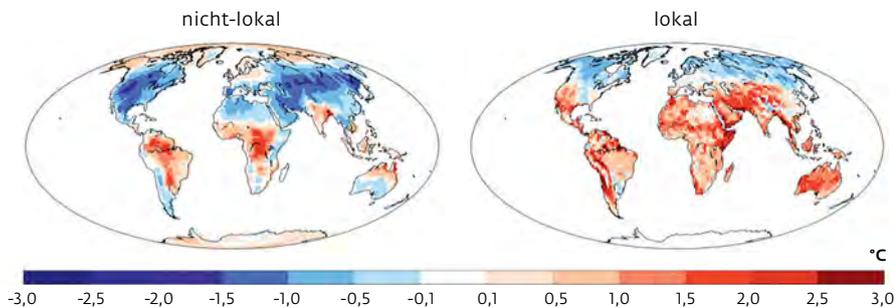
Vielfältige Änderungen der Landnutzung: Nur auf rund einem Viertel der eisfreien Landfläche findet sich Wildnis. Manchmal werden Gebiete so umgewandelt, dass dabei auch die Bedeckung wechselt, etwa von Wald zu Ackerland. Häufiger ist jedoch eine neue Art der Bewirtschaftung, etwa wenn Menschen anfangen, Grasland als Weiden zu nutzen. Beide Änderungsformen beeinflussen das Klima ähnlich stark.

Julia Pongratz' Gruppe widmet sich daher der Aufgabe, verschiedene Aspekte des Landmanagements in Klimamodellen einzubauen. Dass die Modelle die Effekte gerade unterschiedlicher Arten des Landmanagements nicht realistisch abbildeten, zeigt eine kürzlich erschienene Untersuchung, an der Julia Pongratz maßgeblich beteiligt war.

Die Forscher um Almut Arneht vom Karlsruher Institut für Technologie berichteten im Januar 2017 in der Zeitschrift *NATURE GEOSCIENCE*, dass durch Landnutzung und Landmanagement in der Vergangenheit wahrscheinlich noch mehr Kohlendioxid freigesetzt wurde als bislang angenommen. Demnach hätte dieser Faktor im Klimasystem noch mehr als ein Drittel zum Anstieg des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre beigetragen, seit sich der

Mensch die Erde zu eigen gemacht hat. Offenbar haben Vegetationsmodelle diese Emissionen bislang unterschätzt, weil sie Landmanagement nicht realistisch abbildeten. „Ob und wie in einem Wald Holz geerntet wird, haben die Modelle bislang beispielsweise nicht berücksichtigt“, sagt Julia Pongratz.

Damit, die Effekte des Landmanagements in die Klimamodelle zu integrieren, beschäftigt sich unter anderem die Postdoktorandin Kim Naudts. Ihr steht Julia Nabel zur Seite. Die Informatikerin arbeitet als wissenschaftliche Programmiererin der Gruppe die betrachteten Prozesse in das komplexe Erdsystemmodell des Hamburger Max-Planck-Instituts für Meteorologie ein. Außerdem sorgt sie dafür, dass die Modelle auf dem großen Hochleistungsrechner des Deutschen Klimarechenzentrums lau-



Global führt eine Entwaldung durch den Verlust eines CO₂-Speichers stets zu einer Erwärmung. Durch nicht-lokale biogeophysikalische Effekte hat globale Entwaldung in weiten Regionen allerdings eine kühlende Wirkung (blau). Die biogeophysikalischen Faktoren können die Temperaturen vor Ort erhöhen (rot) oder abkühlen (blau). (Skala in Grad Celsius)



Extreme Unterschiede in der Albedo treten auf, wenn – wie hier im Zillertal – verschneite, gut reflektierende Flächen und dunkler Nadelwald, der Licht größtenteils absorbiert, aufeinandertreffen.

fen. Das effiziente Rechnen auf dem Hochleistungsrechner ist unabdingbar, damit die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Atmosphäre sowie regionale Variationen abgebildet werden können.

„Wir betrachten vor allem die Effekte der Forstbewirtschaftung“, berichtet Naudts. In einer früheren Studie untersuchte die Forscherin mit einem Team vom französischen Labor für Klima- und Umweltwissenschaften, wie sich die Artenauswahl durch den Menschen auf die Klimawirkung eines Waldes auswirkt. Weil in Europa in den letzten Jahrhunderten aus ökonomischen Gründen vor allem Nadelbäume angebaut wurden, hat die Vegetation beispielsweise mehr Wärme aufgenom-

men. Zwar speicherten die Koniferen mehr Kohlenstoff als die vorher dort wachsenden Laubbäume, doch der Albedoeffekt wirkte sich stärker aus. „Nadelbäume sind wahrscheinlich nicht die besten Arten, um den Klimawandel in Europa abzumildern“, sagt Kim Naudts.

WIE STARK KANN AUFFORSTUNG DEN KLIMAWANDEL MILDERN?

Nun beschäftigt sie sich damit, welchen Einfluss das Alter eines Waldes auf den Austausch von Kohlenstoff, Wasser und Energie mit der Atmosphäre hat. In den meisten Klimamodellen spielt die Altersstruktur von Wäldern bislang keine Rolle. Die aus Belgien stammende Forscherin untersuchte daher unterschied-

liche Ernteverfahren – und zeigte, dass sich erhebliche Unterschiede bei der Menge des gespeicherten Kohlenstoffs oder bei der Albedo ergeben, wenn das Alter der Wälder bei der Bewirtschaftung berücksichtigt wird. „Um richtig abzuschätzen, wie stark die Forstwirtschaft zur Eindämmung der Erderwärmung beitragen kann, müssen Klimamodelle auch das Alter der Wälder berücksichtigen“, sagt Kim Naudts.

Neben den Folgen von Landnutzungsänderungen untersuchen Julia Pongratz und ihr Team Strategien zum Klimaschutz. So erforscht Sebastian Sonntag, wie stark Aufforstungen den Klimawandel abmildern könnten. Gemeinsam mit Pongratz und anderen Kollegen fand er heraus, dass Aufforstung den CO₂-Gehalt der Atmosphäre stärker reduziert als bisher angenommen: Das Wachstum von Wäldern auf Flächen, die Szenarien zufolge für die Landwirtschaft nicht mehr benötigt werden, könnte den CO₂-Anstieg bis zum Jahr 2100 um 85 ppm reduzieren – derzeit ist bis dahin mit einer Zunahme von heute 400 ppm auf etwa 700 ppm zu rechnen. Die globale Durchschnittstemperatur würde in der Folge bis 2100 nicht um 3,7 Grad Celsius, sondern lediglich um 3,4 Grad ansteigen.

„Das Neue an unserer Studie war, dass wir Rückkopplungen mit dem Kohlenstoffkreislauf in das Modell eingebunden haben – etwa, dass steigende Kohlendioxidwerte in der Atmosphäre das Pflanzenwachstum anregen“, erläutert Sonntag. Allerdings seien auch im neuen Modell noch nicht alle denkbaren Faktoren einbezogen. In Zukunft könnten etwa Dürreperioden oder Nährstoffmangel das Wachstum von Bäumen beeinträchtigen. „Es ist eher

unwahrscheinlich, dass wir das Wachstum der Wälder unterschätzt haben. Es könnte auch schwächer ausfallen als in unserem Modell“, sagt der Physiker. Der Grund dafür: Viele Modelle bilden die Reaktion des Waldes auf Klimaextreme nur ungenügend ab. Dürren können etwa Wälder absterben lassen und noch jahrzehntelang nachwirken: Sie vermindern die Kohlenstoffspeicher der Vegetation so lange, bis sich wieder junger Wald etabliert hat. „Im Modell gibt es diese Altlast so noch nicht“, berichtet Postdoktorandin Lena Boysen, die in ihrer Arbeit diese Lücke schließt.

ALKALISCHERE MEERE BINDEN MEHR KOHLENDIOXID

In einer anderen Arbeit hat Sebastian Sonntag das Aufforstungsszenario mit einer anderen Geoengineering-Methode verglichen, und zwar der Alkalinisierung der Ozeane. „Die Idee beruht darauf, dass die Meere mehr Kohlendioxid binden können, wenn man die Menge an säurebindenden Substanzen erhöht“, sagt Sonntag. In der Praxis könnte die Alkalinität der Meere durch sehr große Mengen zermahlener Kalksteine erhöht werden. Diese Methode wäre möglicherweise effizienter, als Wälder aufzuforsten, so das Ergebnis seiner Untersuchung: Weil Wälder vor allem in hohen Breiten auch eine wärmende Wirkung haben, müsste man der Atmosphäre bei der Aufforstung mehr CO₂ entziehen, um den gleichen Abkühlungseffekt zu erreichen wie bei der Alkalinisierung.

Als eine Maßnahme gegen die globale Erwärmung werden neben der Aufforstung in jüngerer Zeit auch Bioenergiepflanzen diskutiert. „In einigen sozioökonomischen Modellen wird davon ausgegangen, dass in Zukunft große Flächen für den Anbau von Energiepflanzen genutzt werden können“, sagt die Biologin Dorothea Mayer. „Die geerntete Biomasse soll in Kraftstoffe oder Heizenergie umgewandelt werden und so den Verbrauch fossiler Energieträger verringern.“ Allerdings wirft eine solche Nutzung des Landes auch Probleme auf. Denn Energiepflanzen können

leicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion geraten oder natürliche Ökosysteme verdrängen, wie Lena Boysen eindrücklich in früheren Studien mit Kollegen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung zeigte. Deswegen verwendet Mayer in ihren Szenarien nur Ackerflächen, die durch eine intensiviertere Landwirtschaft auf anderen Parzellen ohnehin frei werden.

Baute man auf solchen Flächen Biomassepflanzen wie etwa Elefantengras an, um damit fossile Brennstoffe zu ersetzen, würde das den projizierten CO₂-Anstieg bei ungebremsten Emissionen um maximal ein Drittel mildern – wenn das gesamte geerntete Material fossile Energieträger ersetzen könnte. „So gut sind die Techniken heute allerdings noch nicht“, bemerkt Mayer. Biomasseplantagen können nach ihren Untersuchungen also eine gewisse Rolle dabei spielen, den CO₂-Anstieg zu verlangsamen. Dennoch bleibt es dabei, dass sich der CO₂-Anstieg nur stoppen lässt,

wenn es gelingt, auf fossile Energieträger zu verzichten.

Ein abschließendes Urteil, welche Formen von Land- und Forstwirtschaft dazu beitragen können, den Klimawandel abzumildern, ist nicht leicht zu treffen. Indem Klimaforscher die Erdsystemmodelle stetig verbessern, wichtige Arten von Landmanagement integrieren, gleichzeitig lokale und globale Effekte betrachten, verstünden sie zwar besser, wie sich Änderungen der Landnutzung auswirken, so das Fazit von Julia Pongratz. Doch Empfehlungen für die Politik ließen sich derzeit noch schwer geben. „Man kann sicherlich streiten, ob man die Landnutzung überhaupt zur Abschwächung des Klimawandels nutzen sollte, da viele Prozesse sehr komplex und oft noch nicht gut verstanden sind“, so die Gruppenleiterin. Ihrer Meinung nach sind diese Überlegungen aber sinnvoll. „Wir nutzen das Land so oder so, da sollten wir diese Nutzung auch aktiv gestalten.“ ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

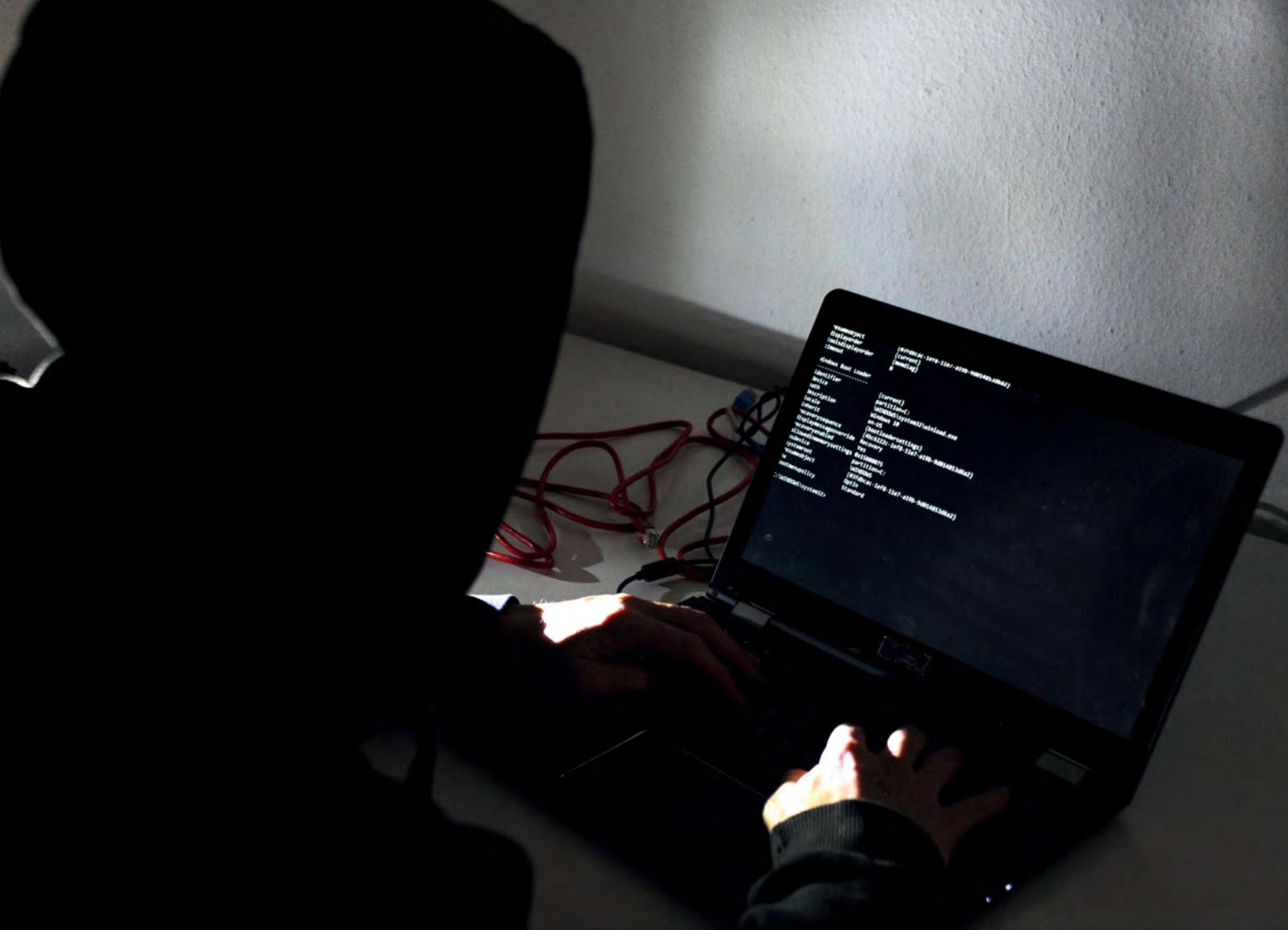
- **Mindestens ein Drittel der vom Menschen bis heute verursachten CO₂-Emissionen stammt aus Landnutzungsänderungen wie etwa Entwaldungen.**
- **Die Effekte einer geänderten Landnutzung sind oft schwer abzuschätzen. So führten Umwandlungen von Wäldern in landwirtschaftliche Flächen durch das freigesetzte CO₂ global bisher zu einer zusätzlichen Erwärmung, die aber durch veränderte Wärme- und Wasserflüsse abgemildert wurde. Am Ort der Entwaldung kann sie in den hohen Breiten durch eine Erhöhung der Albedo jedoch eher zu einer Abkühlung führen, in den Tropen kommt es aufgrund von verringerter Transpiration dagegen meistens zu einer Erwärmung.**
- **Verschiedene Arten von Land- und Forstwirtschaft betreffen etwa die Hälfte der eisfreien Landoberfläche und können Klima und CO₂-Gehalt der Atmosphäre ähnlich stark beeinflussen wie Änderungen in der Landbedeckung. Deshalb arbeitet das Team von Julia Pongratz daran, auch Landmanagement in Erdsystemmodellen abzubilden.**
- **Der vorhergesagte Anstieg der CO₂-Konzentration lässt sich höchstens um ein Drittel reduzieren, indem fossile Treibstoffe als Energieträger durch Biomasse ersetzt werden.**

GLOSSAR

Albedo ist ein Maß für den Anteil des Sonnenlichts, das ins All reflektiert wird, ohne die Atmosphäre zu erwärmen.

Alkalinität gibt wieder, wie alkalisch oder basisch ein Gewässer ist, wie hoch also sein pH-Wert liegt. Das Gegenteil von alkalisch ist sauer.

Landnutzung umfasst alle Arten, wie der Mensch in die Vegetation und den Boden einer Fläche eingreift. Mit Änderungen der Landnutzung kann die Bedeckung einer Fläche wechseln, etwa von Wald zu Acker. Ein Gebiet, zum Beispiel ein Forst, kann aber auch anders bewirtschaftet werden als zuvor.



Strategien gegen Spione

Die Konkurrenz schläft nicht, sie spioniert. Gerade kleine und mittlere Unternehmen werden immer wieder Opfer krimineller Wettbewerber oder Zielscheibe ausländischer Geheimdienste. Doch die meisten Fälle bleiben im Dunkeln. **Michael Kilchling** und sein Team am **Max-Planck-Institut für ausländisches und internationales Strafrecht** in Freiburg möchten nun Licht in die Sache bringen. Gemeinsam mit Fraunhofer-Kollegen untersuchen sie das Ausmaß der Wirtschaftsspionage in Deutschland, wie sich Betriebe dagegen wehren und die Behörden Firmen besser unterstützen können.

TEXT **BENNO STIEBER**

Der chinesische Geschäftsführer kam als ein willkommener Partner zum Betonspezialisten Rieder ins bayrische Kolbermoor. Das Unternehmen für innovative Baustoffe, dessen Glasfaserbetonplatten das Stadion Soccer City in Johannesburg bei der Fußball-Weltmeisterschaft 2010 zu einem architektonischen Glanzstück machten, war froh, für einen millionenschweren Bauauftrag in China einen Partner vor Ort gefunden zu haben. Was in Kolbermoor niemand ahnte: dass es dem chinesischen Unternehmen in Wirklichkeit nur darum ging, Know-how aus Deutschland abzuziehen, um den Auftrag allein zu übernehmen.

Beim Rundgang mit dem Geschäftsführer aus Fernost fiel Mitarbeitern von Rieder dann aber eine Minikamera am Gürtel ihres Gastes auf. Statt den Mann weiter in das Allerheiligste ihrer Firma blicken zu lassen, riefen sie die Polizei. Die Auswertung der Daten in der Gürtelkamera ergab später, dass das Material ausgereicht hätte, um die Hightech-Bauteile in China kopieren und nachbauen zu können. Der Schaden für das mittelständische Unternehmen wäre kaum zu beziffern gewesen.

Der Spionageversuch in der bayrischen Provinz ist im Vergleich zu anderen Fällen, die das Forschungsprojekt mit dem Akronym WiSKoS (Wirtschaftsspionage und Konkurrenzausspähung in Deutschland und Europa) untersucht, eher eine glückliche Ausnahme. Täter, Ziel und Motiv waren offensichtlich. Der Fall konnte schnell und erfolgreich abgeschlossen werden, ohne dass ein bleibender Schaden entstand. Der

Attacke aus dem Netz: Die Täter sitzen oft weit weg in Russland, Indien oder der Karibik. Sie aufzuspüren, ist für deutsche Ermittler schwierig, oft scheitern sie an den Landesgrenzen.

Spion wurde vom Münchner Landgericht zu einer Bewährungsstrafe verurteilt und musste Schadensersatz zahlen.

Bei Wirtschaftsspionage fremder Geheimdienste und vor allem beim Auspähen unter Konkurrenten ist so ein Ende eher die Ausnahme. Die Attacken kommen oft über das Glasfaserkabel. Die Opfer entdecken dann zu spät, dass wertvolle Daten von einem fernen Computer aus abgesaugt wurden. Nur selten lässt sich klären: Ging es um Sabotage oder tatsächlich darum, Know-how zu stehlen? Sind die Hintermänner fremde Geheimdienste, oder war es doch der direkte Konkurrent, der Hacker beauftragt hat? In vielen Fällen kann noch nicht einmal der Schaden für das angegriffene Unternehmen genau beziffert werden. Vor allem bei Angriffen aus dem Cyberspace bleiben Hintermänner, Hintergründe und nicht selten sogar die eigentliche Absicht des Angriffs im Dunkeln.

So war es etwa bei einer Attacke gegen das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Jahr 2014, bei dem offenbar monatelang alle Betriebssysteme mit Trojanern infiziert wurden. Zwar entdeckten die IT-Spezialisten vom Cyber-Abwehrzentrum des DLR im Code der Trojaner chinesische Schriftzeichen, doch das kann auch ein Ablenkungsmanöver eines anderen Geheimdienstes gewesen sein. Das Nachrichtenmagazin *DER SPIEGEL* berichtete damals, das DLR habe das Nationale Cyber-Abwehrzentrum in Bonn eingeschaltet, das auf solche Attacken spezialisiert ist. Doch die eigentlichen Drahtzieher wurden nie aufgespürt.

Spionage findet in Grauzonen statt, am erfolgreichsten ist sie, wenn sie unentdeckt bleibt. Das macht sie zum spannenden Stoff für Filme und Romane aus Zeiten des Kalten Krieges. Aber auch in der globalisierten und digitalen Welt

von heute ist sie eine Erfolg versprechende Möglichkeit für konkurrierende Unternehmen oder für Regierungen von Industrie- und Schwellenländern, um sich mit Know-how aus fremden Forschungslabors im Wettbewerb zu halten. In Zeiten offener Märkte und internationaler Unternehmen haben sich die Bedingungen dafür allerdings enorm gewandelt – weitgehend unbeachtet von Politik und Wissenschaft.

FACHLITERATUR AUS ZEITEN DES KALTEN KRIEGES

Als sich das Forschungsteam des Max-Planck-Instituts für ausländisches und internationales Strafrecht in Freiburg und des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) in Karlsruhe unter der Leitung von Michael Kilchling und Esther Bollhöfer daranzumachte, erst einmal das Ausmaß der heutigen Bedrohung für mittelständische Unternehmen abzuschätzen, waren die Forscher überrascht, wie wenige gesicherte aktuelle Erkenntnisse über Wirtschaftsspionage und Konkurrenzausspähung in Europa überhaupt vorliegen. „Wir haben festgestellt, dass es wirklich einen blinden Fleck gibt“, sagt Kilchling, wissenschaftlicher Referent am Max-Planck-Institut in Freiburg.

Und nicht nur die Agententhriller stammen aus den Zeiten des Kalten Krieges, sondern auch die meiste Fachliteratur über Wirtschaftsspionage. Die Erkenntnisse wurden also vor der Öffnung der Grenzen und dem Zusammenschluss im Europäischen Binnenmarkt gewonnen – einer Zeit, in der es noch eine nationale Wirtschaft gab, die vielfach als Schutzgut des Staates betrachtet wurde.

Diese Lücke soll das gemeinsame Forschungsprojekt WiSKoS schließen. Dabei lieferte das Max-Planck-Institut



Gefährliche Einblicke: Betriebsgeheimnisse sind oft Millionen wert. Besonders kleine und mittlere Unternehmen bräuchten mehr Unterstützung vom Staat, um sich zu schützen.

die juristische und kriminologische Fallanalyse und führte Expertengespräche im europäischen Ausland, während das Fraunhofer-Institut mit seinen guten Kontakten in die Wirtschaft die Befragung der Unternehmen beisteuerte. „Die Zusammenarbeit erwies sich als sehr glücklich“, sagt Michael Kilchling, „da wir einen guten Zugang zu den Behörden haben und das Fraunhofer-Institut bei Unternehmen einen hervorragenden Ruf genießt.“ Trotzdem war das Projekt für alle Beteiligten eine Herausforderung: Die Forscher verknüpften sehr unterschiedliche Herangehensweisen und Methoden, um den Status quo zu analysieren und daraus nicht nur grundlegende Erkenntnisse, sondern auch praktische Empfehlungen zu erarbeiten.

Das Team verschaffte sich zunächst mithilfe einer Umfrage einen möglichst umfassenden Überblick über die Bedrohungslage mittelständischer Unternehmen in Deutschland. Dann erfassen die Forscher die rechtliche Lage in Europa und den Umgang der Behörden

Freiburger Team: Am Max-Planck-Institut für ausländisches und internationales Strafrecht arbeiten Elisa Wallwaey, Michael Kilchling und Susanne Knickmeier (von links) am Projekt WiSKoS.

mit der Thematik, um daraus Abwehrstrategien für Unternehmen und Behörden zu entwickeln.

Esther Bollhöfer betreut das Projekt als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer ISI. Ihr Mitarbeiter, der sich um die Umfrage kümmerte, war überrascht, wie bereitwillig die Mittelständler über ihre Defizite in Sachen Sicherheit Auskunft gaben. Immerhin 612 von 8300 zufällig ausgewählten mittelständischen Unternehmen schickten den Fragebogen an die Forschergruppe

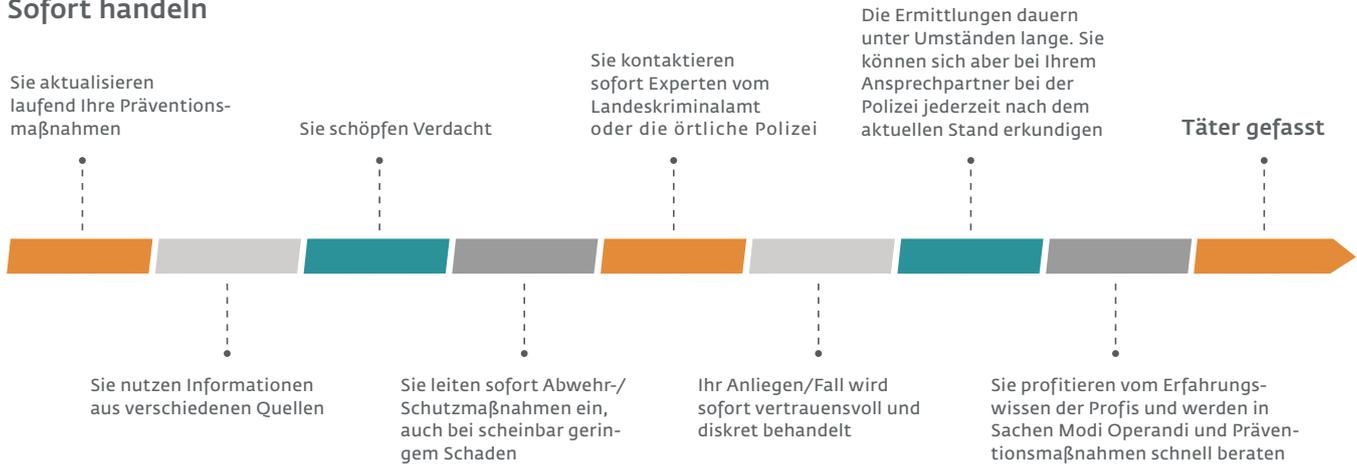
zurück. Jedes fünfte Unternehmen gab zu, keine Strategie zur Abwehr von Spionage zu haben. Viele der Unternehmen würden sich mehr Hilfe vom Staat bei der Prävention wünschen. Nur zehn Firmen lehnten jede Hilfe vom Staat ab.

Obwohl die Befragten anonym blieben, waren nur wenige Unternehmen bereit zu berichten, wie sie mit Verdachtsfällen im eigenen Unternehmen umgehen. „Das kann bedeuten, dass sie darüber nicht sprechen möchten,



Fotos: CCO (oben), Markus Herb (unten)

Sofort handeln



Konkrete Ratschläge: Die Wissenschaftler empfehlen Unternehmen, rechtzeitig eine Strategie gegen Ausspähung zu entwickeln. Dazu gehören geeignete Vorkehrungen und ein Plan, wie Mitarbeiter und Leitung im Ernstfall reagieren sollten.

aber auch, dass sie keine Strategie dafür haben“, sagt Esther Bollhöfer. Von denen, die antworteten, greifen die meisten zu „eigenen Maßnahmen“, also privaten Ermittlungen. Deutlich abgeschlagen lag die Zusammenarbeit mit dem Verfassungsschutz, immerhin etwas besser wurde die Kooperation mit der Polizei eingestuft.

Diese Zurückhaltung gegenüber den Behörden erklärt sich das Forschungsteam auch damit, dass es in Deutschland nicht leicht zu durchschauen ist, wer für welchen Spionagefall der richtige Ansprechpartner ist. Die Zuständigkeit für Prävention und Strafverfolgung von Spionage in Wirtschaftsunternehmen splittet sich hierzulande je nach Delikt zwischen dem Bundesamt für Verfassungsschutz, 16 Landesverfassungsschutzämtern und ebenso vielen Landespolizeibehörden und sogenannten Schwerpunktstaatsanwaltschaften für Wirtschaftsdelikte auf. Behörden, die übrigens auch oft um die raren Fachleute konkurrieren.

Als großen Hemmschuh bei der Strafverfolgung haben die Wissenschaftler die rechtliche Trennung zwischen Wirtschaftsspionage und Konkurrenzausspähung im deutschen Strafrecht ausgemacht. Auch das ein Relikt aus der

Zeit des Kalten Krieges, als der Staat die eigene Wirtschaft vor allem gegen Ausspähung aus dem Ostblock schützen musste. Bis heute gilt: Steckt hinter einem Ausspähversuch ein fremder Geheimdienst, kann neben der Polizei auch der Verfassungsschutz zuständig sein. Die strafrechtliche Verfolgung liegt dann grundsätzlich bei der Bundesanwaltschaft, die entweder das Bundes- oder ein Landeskriminalamt mit den Ermittlungen beauftragt.

Lässt sich die Beteiligung ausländischer Nachrichtendienste nicht beweisen, handelt es sich um Konkurrenzausspähung, wofür die örtliche Staatsanwaltschaft mit Unterstützung der lokalen Polizei zuständig ist. Oftmals sind die Täter bereits verschwunden und ihre Spuren verwischt, sodass die Ermittlungsverfahren eingestellt werden müssen.

So geschehen in einem Fall, den Susanne Knickmeier vom Freiburger Max-Planck-Institut in Ermittlungsakten gefunden hat. Ein großes deutsches Unternehmen stellte fest, dass beachtliche Datenmengen aus seinem Rechenzentrum abgezogen wurden. Statt das Datenleck zu schließen, versuchten die zuständigen Mitarbeiter, den Cyberspionen eine Falle zu stellen. Sie ließen die

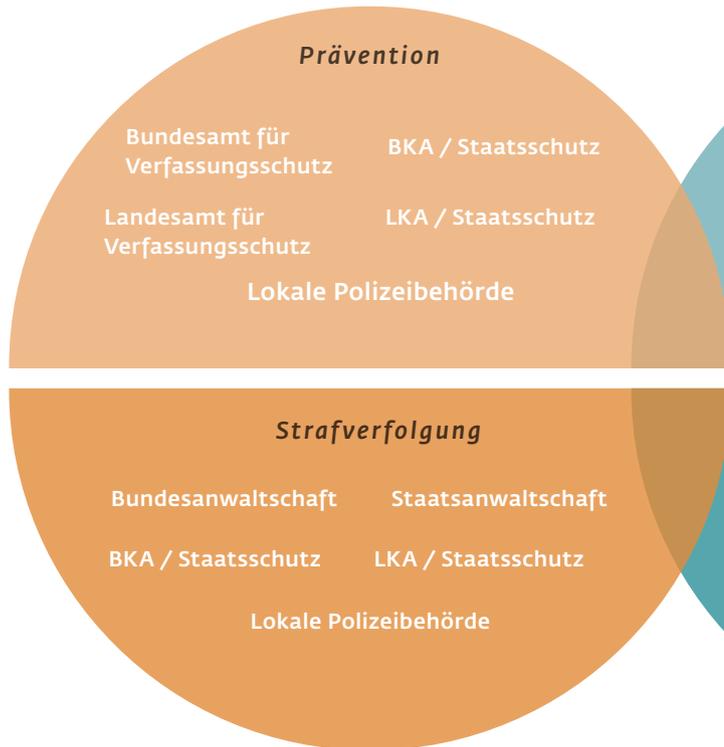
Datenräuber weiter gewähren, bauten aber parallel ein neues System auf, in dem sie wichtige Daten in Sicherheit bringen konnten. So ließen sie die Spione in dem Glauben, weiter unentdeckt arbeiten zu können. Die Behörden hatten dadurch genügend Zeit, die Datenströme ins Ausland zu verfolgen.

DÜNNE AKTE TROTZ INTENSIVER ERMITTLUNGEN

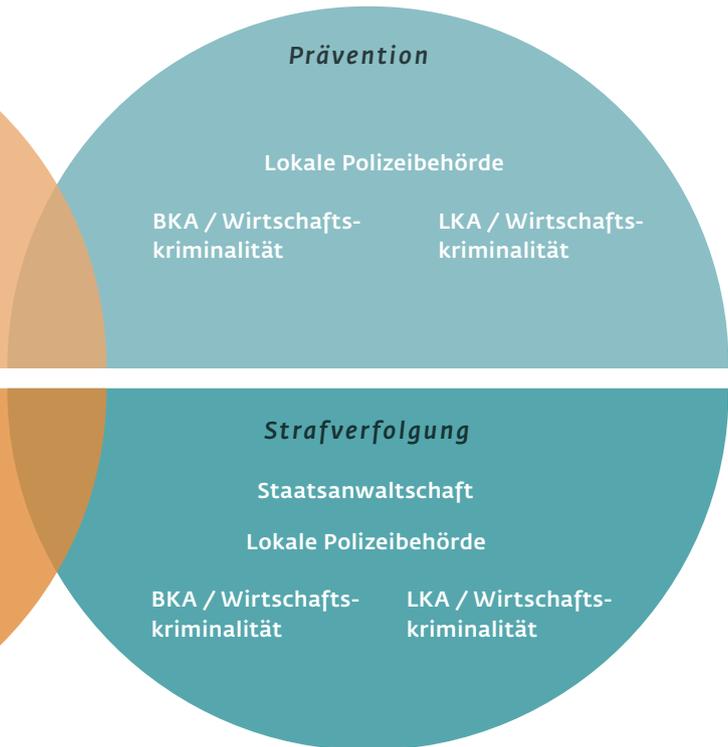
Zugreifen konnten sie dort nicht. Das Landeskriminalamt machte in seiner Untersuchung die wahren Hintermänner des Angriffs nicht ausfindig, die Bundesanwaltschaft brach die Ermittlungen ab. Nun übernahm die örtliche Staatsanwaltschaft den Fall und versuchte, konkrete Personen hinter dem Angriff zu identifizieren – ebenfalls ohne Erfolg. Das Verfahren musste schließlich eingestellt werden.

„Das ist dann nur eine dünne Akte“, sagt Susanne Knickmeier, „doch durch die Interviews mit den Ermittlern wissen wir, wie aufwendig die Ermittlungen waren, auch wenn sie am Ende ins Nichts führten.“ Der Fall zeigt, dass die Möglichkeiten der Ermittler an Landesgrenzen scheitern, was nur durch internationale Kooperationsabkommen zu

WIRTSCHAFTSSPIONAGE



KONKURRENZAUSSPÄHUNG



Schwierige Trennung: Je nachdem, ob ein Geheimdienst spioniert (Wirtschaftsspionage) oder ein konkurrierendes Unternehmen (Konkurrenzausspähung), sind unterschiedliche Behörden für Prävention und Strafverfolgung zuständig. Die Wissenschaftler empfehlen, die Kompetenzen zu bündeln.

lösen wäre. Er zeigt aber auch, dass durch die unterschiedlichen Zuständigkeiten der deutschen Behörden oft viel Zeit verloren geht, um Hintergründe zu ermitteln.

Die juristische Unterscheidung zwischen Wirtschaftsspionage und Konkurrenzausspähung und die damit verbundenen unterschiedlichen Zuständigkeiten halten die Forscher vom Fraunhofer ISI und vom Freiburger Max-Planck-Institut nach ihren Gesprächen mit Unternehmen und Behörden für überholt. Konkret empfehlen sie eine Gesetzesreform, welche die geschädigten Unternehmen in den Mittelpunkt stellt. „Das Rechtsgut nationale Wirtschaft gibt es in Zeiten des europäischen Binnenmarkts nicht mehr“, sagt Michael Kilchling, und den angegriffenen Unternehmen seien die politischen Hintergründe egal.

Sie wünschen sich, dass das Leck schnell geschlossen wird, der Täter ermittelt und sie – wenn möglich – Schadensersatz geltend machen können.

Das zeigt auch die Befragung: Die Unternehmen sind zur Zusammenarbeit mit Behörden bereit, wenn Aufwand und Ertrag in sinnvoller Relation stehen und sie selbst eine Chance zur Aufklärung sehen. Die Anonymität gegenüber Behörden bei der Anzeige ist dagegen nur einem geringen Teil der befragten Unternehmen wichtig.

FRÜHSTÜCKSRUNDEN ZUR SPIONAGEPRÄVENTION

Einen weiteren wesentlichen Ansatz, um Firmen wirkungsvoll zu schützen, sehen Kilchling und Bollhöfer in der Prävention. Da könne man sich auch an anderen europäischen Nationen orientieren. Wie unterschiedlich das Thema von Land zu Land behandelt wird, sage viel über das Verhältnis von Staat und Wirtschaft im jeweiligen Land aus, so Michael Kilchling. In Frankreich etwa mit seiner traditionell engen Verbindung zwischen beiden Bereichen gibt es seit 1997 eine „Ecole de Guerre

Economique“. In der Hochschule für Graduierte lernen 50 Studenten in zehn Monaten die Regeln für den – wörtlich übersetzt – „Wirtschaftskrieg“, also wie man strategische Informationen über Konkurrenten gewinnt; aber auch, wie man Ausspähversuche abwehrt. Die Absolventen dieses Aufbaustudiengangs arbeiten später oft in Sicherheitsberatungsfirmen oder Strategieabteilungen großer Unternehmen.

Bei der Prävention könnte Deutschland sowohl von den Briten als auch von den Dänen einiges lernen. In Großbritannien findet Spionageprävention vor allem in informellen Kreisen und Frühstücksrunden statt, zu denen Unternehmer erst Zugang bekommen, wenn sie gewisse Fortbildungen absolviert haben, die staatlich gefördert werden. Dort lernen sich Unternehmer, Sicherheitsexperten und Strafverfolger persönlich kennen und knüpfen vertraute Kontakte. Denn Vertrauen ist eine wichtige Grundlage, um im Ernstfall gut zusammenzuarbeiten.

Gute Erfahrung mit informellen Netzwerken hat auch Dänemark gemacht. Dort gibt es ebenfalls einen intensiven informellen Informationsaustausch zwischen Behörden und Wirtschaft, an dem auch Mittelständler beteiligt sind. Darüber hinaus verlangt der dänische Staat von allen börsennotierten Unternehmen ein Risiko-Assessment, also eine Bestandsaufnahme und die Bewertung von Risiken und Sicherheitsmaßnahmen zur Abwehr von Spionage.

Auf diese Weise haben sich in Dänemark nicht nur in börsennotierten Unternehmen allgemeine Sicherheitsstandards durchgesetzt. Diesen staatlichen Vorgaben würden sich auch viele deutsche Unternehmen gern unterwerfen. Mehr als die Hälfte der befragten Unternehmer fänden eine Art staatlichen Spionage-TÜV „sehr gut“ oder wenigstens „gut“. Außerdem würden sie sich mehr Informationsveranstaltungen von staatlicher Seite und persönliche Ansprechpartner bei den Behörden wünschen.

Der europäische Vergleich zeigt aber auch: Deutsche Unternehmen werden nicht häufiger ausspioniert als Unternehmen anderer Länder. Eine Erkenntnis, die einerseits beruhigend ist, aber angesichts des besonders innovativen Rufes deutscher Unternehmen in der Welt auch ein wenig kränkend sein könnte. Häufiger ausgespäht werden Firmen, die nicht nur eine Produktionsstätte, sondern auch Abteilungen für Forschung und Entwicklung im Ausland haben. Diese Außenstellen, meist kleiner und schlechter gesichert als Abteilungen im Mutterhaus, erweisen sich offensichtlich als besonders verwundbar. „Das heißt umgekehrt, dass die Stammsitze in Deutschland offenbar gewisse Hürden für die Spione bedeuten“, interpretiert Esther Bollhöfer.

Eine oft unterschätzte Gefahr, auch das zeigt die Analyse der Forschungsgruppe WiSKoS, ist Spionage an Hochschulen. Wissenschaftler und Studenten gerade an technischen Hochschulen arbeiten häufig mit vertraulichen Daten aus der Industrie, die oft durch die Hände Dutzender wissenschaftlicher

Hilfskräfte gehen. Schutz ist da ziemlich schwierig. Und auch über das Internet versuchen Spione, wissenschaftliche Daten zu stehlen.

FORSCHUNGSINSTITUTE IM VISIER VON AGENTEN

Institute der Max-Planck-Gesellschaft sind selbst immer wieder das Ziel von Hackerangriffen. Rainer Gerling, IT-Sicherheitsbeauftragter der Max-Planck-Gesellschaft, kann von vielen ausgefeilten Attacken berichten. Dabei hätten es Spitzel nicht nur auf biomedizinische Erkenntnisse oder neue Entwicklungen in der Materialforschung abgesehen. „Forscher, die politische und ökonomische Zusammenhänge untersuchen und womöglich in diesem Umfeld auch Beratungen machen, stehen genauso im Fokus“, berichtet Gerling. „Wenn sich Sozialwissenschaftler etwa mit gesellschaftlichen Strukturen von Minderheiten in bestimmten Ländern befassen, dann gibt es Interesse daran, diese Informationen zu bekommen.“

Bei den Bemühungen, Forschungsdaten zu schützen, kommt erschwerend hinzu, dass die Wissenschaft vom internationalen Austausch lebt. Gastwissenschaftler aus aller Welt kommen für einige Wochen oder Monate in Forschungsinstitute, arbeiten mit in den Labors, nehmen an Besprechungen teil und bekommen auf diese Weise Einblick in Technologien, Methoden und Ansätze, die noch nicht publiziert wur-

den. „Viele wissenschaftliche Institute sind sich dieser Gefahr gar nicht bewusst“, sagt Max-Planck-Forscherin Susanne Knickmeier. Selbstverständlich dürfen Gastdozenten und Studenten aus dem Ausland nicht unter Generalverdacht gestellt werden. Andererseits weist auch der Verfassungsschutz darauf hin, dass Länder wie China von ihren Auslandsstudenten erwarten, Kontakt zu den jeweiligen Botschaften zu halten, sodass der jeweilige Geheimdienst sie jederzeit anwerben kann.

Ein wenig Sensibilität an den Hochschulen wäre also zu erwarten. Doch als die WiSKoS-Forscher Universitäten anscrieben, um mit ihnen über die Gefahren der Ausspähung zu sprechen, bekamen sie, wie sich Elisa Wallwaey vom Max-Planck-Institut erinnert, von einem Institut als Antwort: „Wir sprechen gern mit Ihnen. Aber wie kommen Sie darauf, dass wir gefährdet sein könnten?“

Die Auswertung der Ergebnisse hat das WiSKoS-Team inzwischen fast beendet. Im Mai präsentieren die Forscher die Resultate auf einer Abschlusskonferenz in Brühl bei Bonn unter Schirmherrschaft des Bundeskriminalamts. Zum selben Zeitpunkt publizieren sie jeweils eigene Leitfäden mit praktischen Empfehlungen für Unternehmen, Polizeibehörden und Wissenschaftsorganisationen. Denn erklärtes Ziel des Projekts ist es, die Erkenntnisse möglichst direkt in die Anwendung zu bringen und so den Spionen die Arbeit zumindest ein wenig schwerer zu machen. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Das Ausspähen von Firmengeheimnissen, besonders auf elektronischem Wege, stellt eine zunehmende Gefahr für kleinere und mittlere Unternehmen in Deutschland dar; die wenigsten sind dagegen gewappnet.
- Die rechtliche Trennung zwischen Wirtschaftsspionage und Konkurrenzausspähung im deutschen Strafrecht erschwert die Verfolgung der Täter. Besser wäre es, wenn die Behörden ihre Kräfte bündelten.
- Zur besseren Prävention empfehlen Wissenschaftler staatlich festgelegte Sicherheitsstandards und eine bessere Vernetzung von Behörden und Unternehmen, schon bevor ein Spionagefall auftritt.
- Auch wissenschaftliche Einrichtungen sollten sich gegen Ausspähung schützen.

Moleküle – auf Eis gelegt

Die Kryo-Elektronenmikroskopie ermöglicht es, winzige Strukturen wie Moleküle bis aufs Atom genau abzubilden. Für ihren Beitrag zur Entwicklung dieser Technik bekamen der Brite Richard Henderson, der deutschstämmige US-Forscher Joachim Frank und der Schweizer Jacques Dubochet den Chemie-Nobelpreis 2017. Am **Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft** in Berlin war der ehemalige Arbeitsgruppenleiter Friedrich Zemlin mit dabei, als die Methode in den 1980er-Jahren ihren Platz in der Biologie eroberte.

TEXT **ELKE MAIER**

Um bis in die aller kleinsten Dimensionen des Lebens vorzudringen, legen Wissenschaftler ihre Forschungsobjekte gerne auf Eis: Sie platzieren sie auf einem winzigen Gitter und tauchen sie blitzschnell in ein minus 196 Grad kaltes Ethanbad, sodass die Probe innerhalb weniger Tausendstelsekunden erstarrt. Anschließend durchleuchten sie ihr schockgefrostetes Präparat mit Elektronenstrahlen.

Die Bilder, die sie mithilfe der Kryo-Elektronenmikroskopie (griechisch kryos = kalt) gewinnen, nachdem sie am Computer Tausende von Einzelaufnahmen zu einem Gesamtbild verrechnet haben, sind spektakulär: Sie zeigen etwa Bakterien, die Zellen attackieren, ebenso wie feinste Strukturen auf der Oberfläche des Zikavirus oder fehlgefaltete Proteine im Gehirn von Alzheimer-Patienten. Forscher können damit sogar Moleküle in Bewegung „einfrieren“ und so die komplizierten Vorgänge im Zellinnern sichtbar machen – etwa die Herstellung von Proteinen an den Ribosomen, den Eiweißfabriken der Zelle.

Dabei glaubte lange Zeit niemand daran, dass sich das Elektronenmikroskop jemals für die Abbildung biologischer Objekte eignen würde: Damit die Elektronen ausschließlich vom Präparat abgelenkt werden, herrscht im Innern ein Hochvakuum, in dem

wasserhaltige Präparate wie Zellen normalerweise sofort austrocknen und bis zur Unkenntlichkeit schrumpeln würden. Hinzu kommt die schädigende Wirkung der Strahlung: Ernst Ruska, der Erfinder des Elektronenmikroskops, hatte damit einst sogar einen Metallfaden zum Verdampfen gebracht – keine guten Aussichten für die viel empfindlicheren Proben der Biologen!

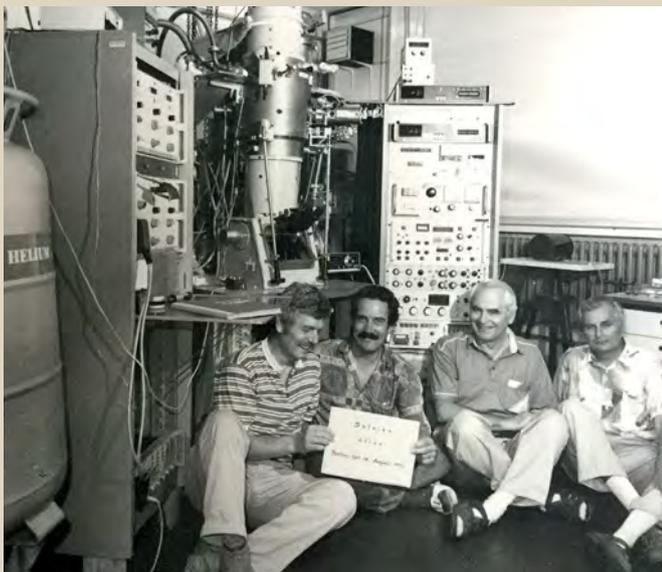
Auch Richard Henderson, der in den 1970er-Jahren am MRC Laboratory of Molecular Biology in Cambridge an Membranproteinen forschte, zog die Elektronenmikroskopie anfangs gar nicht in Betracht. Stattdessen versuchte er, die Struktur der Proteine mittels Röntgenkristallografie zu bestimmen – damals die Methode der Wahl. Damit stieß er jedoch schon bald an die Grenzen: Manche Proteine ließen sich nicht in ausreichender Menge gewinnen, andere bildeten partout keine Kristalle. Und um die Moleküle in ihrer natürlichen Umgebung – der Zellmembran – darzustellen, blieb ohnehin nur das Elektronenmikroskop.

Hendersons Lieblingsprotein war das Bacteriorhodopsin – ein rotes Pigment, das in der Zellwand des salzliebenden Einzellers *Halobacterium salinarum* vorkommt und manchmal ganze Salinen rot färbt. Um das Protein im Originalzustand abzubilden, legten er und sein Kollege Nigel Unwin die ganze Membran ins Mikroskop und wählten die Strahlendosis so gering wie nur irgend möglich. Der Clou dabei war eine Zuckerlösung, mit der die Forscher ihr Präparat benetzten und die sich als wirksamer Schutz gegen Austrocknung erwies. Weil das Protein so regelmäßig geformt ist, klappte es selbst mit den kontrastarmen Aufnahmen, seine Struktur in 3D zu rekonstruieren.

Das Bild erschien 1975 im Fachblatt NATURE und zeigt, wie sich die Proteinkette des Moleküls siebenmal durch die Zellwand schlängelt. Die Auflösung beträgt 0,7 Nanometer (milliardstel Meter) – etwa die Länge von sieben aneinandergelagerten Atomen. Es war damals die beste Darstellung eines Proteins, die jemals mit einem Elektronenmikroskop erzielt worden war.

Richard Henderson war damit aber noch nicht zufrieden. Er wollte sein Molekül bis aufs Atom genau abbilden. Vor allem die Arbeit eines Teams der Abteilung Elektronenmikroskopie am Fritz-

Abschied von SULEIKA: Friedrich Zemlin und sein Team versammeln sich ein letztes Mal vor der Kryo-Apparatur, mit der die nobelpreiswürdigen Aufnahmen des Bacteriorhodopsins gelangen. Das exzellente Objektiv wurde anschließend ausgebaut und in ein moderneres Mikroskop integriert. Von links: Friedrich Zemlin, Rolf Meilicke, Erich Beckmann und Klaus Heinrich.



Haber-Institut (FHI) der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin überzeugte ihn, dass noch Luft nach oben war: Im Jahr 1984 hatten Elmar Zeitler und Friedrich Zemlin gemeinsam mit Kollegen von der University of Arizona die Struktur des Klapperschlangengifts Crotoxin mit einer Auflösung von 0,35 Nanometern veröffentlicht.

„Wir hatten am Institut ein ganz hervorragendes Mikroskop“, sagt Friedrich Zemlin. „Vor allem das heliumgekühlte, supraleitende Objektiv, das die Physikerin Isolde Dietrich bei Siemens in München entwickelt hatte, war fantastisch. Es war Teil eines Laboraufbaus, den wir am FHI zusammengebaut und dem wir den Namen SULEIKA gegeben haben – supraleitende Kryo-Apparatur.“ Richard Henderson reiste von 1984 an immer wieder nach Berlin, um mit SULEIKA zu arbeiten.

Auf der anderen Seite des Atlantiks, am New York State Department of Health, tüftelte Joachim Frank bereits seit mehreren Jahren an Algorithmen für die Bildbearbeitung. Der in Deutschland geborene Forscher, der später die amerikanische Staatsbürgerschaft annahm, hatte als Doktorand am Max-Planck-Institut für Eiweiß- und Lederforschung in München gearbeitet, dem

DIE ZEIT VOM 22. Januar 1982



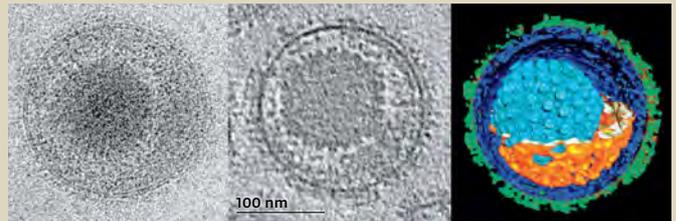
Tiefsttemperatur-Mikroskopie und Tiefstgefrieren, so scheint es, kündigen ein neues Kapitel der Molekularbiologie an: die direkte Beobachtung der elementarsten Lebensvorgänge unterm Mikroskop.

Vorläufer des Martinsrieder Max-Planck-Instituts für Biochemie. Sein Mentor war Walter Hoppe, ein Experte auf dem Gebiet der Röntgenkristallografie, der Anfang der 1970er-Jahre zur Elektronenmikroskopie umgeschwenkt war.

Hoppes Spezialität war die 3D-Rekonstruktion von komplexen molekularen Strukturen wie etwa Enzymen. Dafür nahm er ein und dasselbe Objekt tomografisch aus unterschiedlichen Blickwinkeln auf und kombinierte die Aufnahmen am Computer zu einem dreidimensionalen Gesamtbild. Problematisch dabei war vor allem, dass sich durch die Mehrfachaufnahmen auch die schädliche Strahlendosis addierte.

Frank versuchte, dies zu umgehen, indem er eine einzige Aufnahme von vielen gleichartigen Teilchen in einer Lösung anfertigte. Die Strahlenbelastung blieb so viel geringer. Umso komplizierter war dafür die Bildanalyse, denn die Teilchen lagen kreuz und quer durcheinander und hoben sich oft nur schlecht vom Hintergrund ab. Hinzu kamen auch noch Verunreinigungen – eine riesige Herausforderung, vor allem bei der geringen Rechenleistung der damaligen Computer.

Trotzdem gelang es Frank, Algorithmen auszuarbeiten, um die bunt verstreuten Partikel nach wiederkehrenden Strukturen zu durchsuchen und daraus ein scharfes dreidimensionales Gesamtbild der Struktur zu errechnen. Gemeinsam mit dem Physiker Marin van Heel, der später ebenfalls am FHI forschte und als Pionier in der Darstellung von Einzelmolekülen gilt, veröffentlichte Frank im Jahr 1981 die ersten Programme. Im selben Jahr kam Franks Softwarepaket SPIDER heraus, ein umfassendes Werkzeug für die computergestützte Bildanalyse.



Werdegang eines Virus: Für eine 3D-Ansicht von *Herpes simplex* nehmen die Forscher ihr Objekt aus unterschiedlichen Blickwinkeln auf. Diese 2D-Aufnahmen verrechnen sie dann zu einem Gesamtbild. Zu sehen sind eine Mikroskopaufnahme (links), das rekonstruierte und entrauschte Tomogramm (Mitte) sowie eine 3D-Rekonstruktion (rechts).

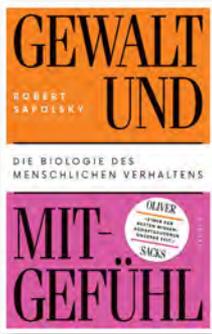
Blieb noch zu klären, wie man biologische Proben im Vakuum des Elektronenmikroskops vor dem Austrocknen schützen sollte. Richard Henderson verwendete in seinen Bacteriorhodopsin-Studien eine Zuckerlösung, was sich jedoch längst nicht für alle Präparate eignete. Manche Forscher hatten auch schon versucht, ihre Proben einzufrieren. Dabei bildeten sich jedoch Eiskristalle, welche die filigranen Strukturen der Probe sprengten und obendrein auch noch den Elektronenstrahl ablenkten.

Dass der Weg über das Eis trotzdem der richtige war, bewies Jacques Dubochet, der damals am European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg an genau diesem Problem forschte. Eine Idee war, die Probe so schnell abzukühlen, dass für die Bildung von Eiskristallen keine Zeit blieb. Viele Kollegen hielten das für utopisch, denn dafür musste die Probe innerhalb einiger Tausendstelsekunden eine Temperatur von weniger als minus 150 Grad Celsius erreichen – eine Kühlrate von mehr als 10 000 Grad Celsius pro Sekunde.

Doch Dubochet schaffte das scheinbar Unmögliche. Dafür kühlte er Wasser in Sekundenbruchteilen in einem eiskalten Ethanbad ab, sodass die Flüssigkeit als glasartige Masse erstarrte – ein Zustand, den Forscher als vitrifiziertes Wasser bezeichnen. Die Methode erwies sich als bestens geeignet, um biologische Präparate im Vakuum des Elektronenmikroskops vor Austrocknung zu bewahren: Vitrifiziertes Wasser bildet keine zerstörerischen Eiskristalle und lässt die Elektronen ungehindert passieren; die niedrige Temperatur schützt zudem vor Strahlungsschäden. „Mithilfe der Kryotechnik ist es uns Mitte der 1980er-Jahre gelungen, Paraffinmoleküle elektronenmikroskopisch abzubilden“, sagt Friedrich Zemlin. „Das war ein echter Durchbruch, denn die langen Kohlenwasserstoffketten sind gegenüber Elektronenstrahlen extrem empfindlich.“

Wenig später eroberte das Elektronenmikroskop auch in der Biologie seinen festen Platz. Die erste Darstellung eines Proteins in atomarer Auflösung veröffentlichten Richard Henderson und seine Kollegen im Jahr 1990: Nach jahrelanger Tüftelei war es den Forschern schließlich gelungen, das Bacteriorhodopsin in einer Auflösung von 0,35 Nanometern abzubilden. Dafür hatten sie Hunderte von Einzelaufnahmen im Computer zu einer hochauflösenden 3D-Struktur verrechnet; die meisten davon stammten von SULEIKA. Friedrich Zemlin und sein Mitarbeiter Erich Beckmann sind unter den Co-Autoren dieser Pionierarbeit.

Das legendäre Objektiv, mit dem die Aufnahmen gelangen, wurde später in ein moderneres Philips-Mikroskop eingebaut und befindet sich heute am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen. Institutsdirektor Holger Stark, ehemals Doktorand bei Friedrich Zemlin und Marin van Heel am FHI, hatte das Gerät „geerbt“ und mitgenommen, als er 2001 nach Göttingen umzog. Noch mehrere Jahre war es dort erfolgreich im Einsatz.



Die Macht der Automatismen

Robert M. Sapolsky, **Gewalt und Mitgefühl**, Die Biologie des menschlichen Verhaltens

1024 Seiten, Carl Hanser Verlag, München 2017, 38,00 Euro

My Lai – dieses vietnamesische Dorf ist einer der historischen Inbegriffe für das ungeheure Ausmaß menschlicher Gewalt. Im Frühjahr 1968 massakrierten dort US-amerikanische Soldaten während des Vietnamkriegs Hunderte Zivilisten, ohne auch nur im Entferntesten auf kampfberedete Gegner gestoßen zu sein. My Lai beinhaltet für den Primatologen und Neurobiologen Robert M. Sapolsky aber auch einen Hoffnungsschimmer – in Form von mitfühlendem Handeln. Denn immerhin hätten drei US-Soldaten Widerstand geleistet und einige Dorfbewohner aus der Kampfzone gerettet.

Unter anderem anhand dieses Massakers illustriert Sapolsky eine der beiden zentralen Thesen seines Buchs: dass wir Menschen immer Potenzial zu beidem besäßen – zu fürchtbarer Gewalt, aber eben auch zu couragiertem Mitgefühl. Sapolskys zweite Hauptthese ist nicht weniger global: dass es einer Vielzahl an wissenschaftlichen Blickwinkeln bedürfe, um diese beiden Phänomene zu erforschen und zu erklären. Denn das menschliche Verhalten sei generell geprägt von einem „fürchterlichen Durcheinander aus Neurochemie, Hormonen, Sinnesreizen, pränataler Umgebung, Früherfahrung, Genen, biologischer und kultureller Evolution, Umweltdruck und vielem mehr“, also aus einem komplexen Gefüge aus Natur und Kultur.

Auch wenn im Laufe der Lektüre des mehr als tausend Seiten umfassenden Wälzers durchscheint, dass selbst Sapols-

ky die Biologie als das Nonplusultra ansieht, um Gewalt und Mitgefühl zu ergründen (und er dafür eigens die Anhänge „Basiswissen Neurowissenschaft“, „Grundlagen der Endokrinologie“ sowie „Proteine“ anbietet) – deutlich wird auch, dass er nichts von eindimensionalen Erklärungsmustern und schnellen (neuro-)wissenschaftlichen Hypes hält.

So äußert er Zweifel an der Deutungsmacht der Spiegelneuronen-These, und auch ein Zuviel an Empathievermögen sei für mitfühlendes Handeln kontraproduktiv. Zudem erteilt der Autor vermeintlichen Wunderhormonen eine Abfuhr. Denn diese „verstärken Prosozialität nur in Bezug auf ein *Wir*. Haben wir es mit *Anderen* zu tun, werden wir unter dem Einfluss von Oxytocin und Vasopressin ethnozentrischer und fremdenfeindlicher. Oxytocin ist kein universelles Liebeshormon, sondern ausgesprochen parteiisch und provinziell in seiner Wirkung.“

Immer wieder berührt Robert M. Sapolsky diese für sein Buch zentrale Dichotomie zwischen einem „Wir“ und einem „Sie“. Dem Autor zufolge halten neurobiologische Automatismen uns Menschen dazu an, unsere eigene, in puncto Zugehörigkeit eng definierte Gruppe zu bevorzugen und das meiste Fremde abzulehnen oder, schlimmer, zu vernichten: Unter anderem die Insellappen unseres Gehirns seien dafür die Wegbereiter – weil sie Metaphorisches mit Buchstäblichem verwechseln. Dies habe zur Folge, dass dank entsprechender Propaganda das Unreine

sowie Animalische im Feind so sehr verinnerlicht werde, dass dieser Andere ausgelöscht werden müsse.

Sapolskys umfassende Studie unterhält mit mehr oder weniger subtiler Ironie und interdisziplinären Kontroversen. So solle das US-amerikanische Strafsystem mit seinem jetzigen Fokus auf der individuellen Schuldfrage abgeschafft werden, und auch das weiterhin brisant umkämpfte Konzept eines (eingeschränkten) freien Willens lehnt der Autor gänzlich ab. Damit setzt er letztendlich doch deutliche Grenzen zwischen Natur- und Geisteswissenschaften; gleichzeitig schafft er aber auch Brücken, etwa indem er eine erfrischende Reflexionsbereitschaft gegenüber naturwissenschaftlichen Studienergebnissen offenbart, die Geschlechterfragen berühren.

Die Überwindung von „Wir“ und „Sie“ ist laut Sapolsky neurobiologisch äußerst anspruchsvoll. Trotzdem besteht laut dem Autor Hoffnung für all jene, die nicht so einen stark ausgeprägten mitfühlenden Kompass besitzen wie die drei US-Soldaten, die in My Lai die Hilflosen beschützten – dank anderer Automatismen: „Entscheidend ist weder ein gutes (limbisches) Herz noch ein frontaler Kortex, der Sie auf rationalen Wegen zum Handeln führen kann. Viel wichtiger sind Dinge, die wir schon seit Langem ganz selbstverständlich und automatisch tun – dass wir gelernt haben, auf die Toilette zu gehen, Fahrrad zu fahren, die Wahrheit zu sagen und jemandem in Not zu helfen.“ Anne-Kathrin Weber



Laufen. Schwimmen. Fliegen.

James Cheshire, Oliver Uberti, **Die Wege der Tiere**, Ihre Wanderungen an Land, zu Wasser und in der Luft – in 50 Karten

174 Seiten, Carl Hanser Verlag, München 2017, 34,00 Euro

Als am 21. Mai 1822 ein Weißstorch mit einem 80 Zentimeter langen Speer durch den Hals in Norddeutschland landet, ist die Sensation perfekt. Der Wurfspieß stammt aus Zentralafrika und liefert den ersten Beweis für die Langstreckenwanderungen der Vögel. Zuvor kursierten über den Verbleib der Tiere in der kalten Jahreszeit wilde Spekulationen: Aristoteles glaubte, sie hielten Winterschlaf; in einem Essay aus dem Jahr 1703 ist zu lesen, sie überwinterten auf dem Mond.

Seither hat sich viel getan, und die Methoden, mit denen Forscher den Wegen der Tiere nachspüren, wurden mehr und mehr verfeinert: Während John James Audubon im Jahr 1803 Singvögeln noch Fäden an die Beine band, um zu zeigen, dass jede Saison dieselben Tiere zu seiner Farm zurückkehren, setzte ein deutscher Apotheker rund 100 Jahre später bereits automatische Kameras ein, um die Reisen von Tauben zu dokumentieren. 1962 statteten Wissenschaftler eine Ente mit einem Funksender aus, und 1997 ermöglichten es GPS-Halsbänder erstmals, die Wanderungen von Elefanten zu verfolgen.

Mittlerweile lassen sich die leistungsstarken Hightechsender so klein bauen, dass selbst Tiere von der Größe einer Hummel sie tragen können. Bei Bedarf liefern die modernen Geräte nicht nur Daten zur Position, sondern auch Messwerte wie Temperatur, Beschleunigung oder Tauchtiefe. All das generiert eine immense Datenflut, die ausgewertet und interpretiert werden will. Dass es dabei auch noch ge-

lingen kann, die Ergebnisse in optisch ansprechender Form so zu verpacken, dass Laien etwas davon haben, beweisen James Cheshire und Oliver Uberti im vorliegenden Buch.

Die Autoren sind auf dem Gebiet der Kartografie keine Neulinge: Cheshire ist Geograf und Dozent am University College London. Uberti arbeitet als Designer und war früher Bildredakteur bei NATIONAL GEOGRAPHIC. Für ihr Erstlingswerk *London – The Information Capital* wurden die beiden im Jahr 2015 mit dem Preis der British Cartographic Society für herausragende Kartografie ausgezeichnet.

Das neue Werk des Autorenduos ist ein Band mit 50 aufwendig gestalteten – teilweise ausklappbaren – Karten und Infografiken, welche die Wege der Tiere an Land, zu Wasser und in der Luft dokumentieren. Sie zeigen beispielsweise die Marschrouten von Elefanten durch den kenianischen Busch, die Schwimmrichtung einer Meeresschildkröte auf ihrer 11600 Kilometer langen Reise quer durch den Atlantik; oder sie zeichnen auf, wie Hummeln in der Nähe des Max-Planck-Instituts für Ornithologie in Radolfzell durch die Wiesen und Gärten schwirren.

Das Buch ist aber nicht nur optisch ansprechend, sondern liefert auch informative und spannende Texte. Cheshire und Uberti reisen dafür selbst vor Ort, um mit den Wissenschaftlern zu sprechen und sie bei der Arbeit zu begleiten. So ist Uberti etwa mit dabei, wenn Tierschützer in Kenia per GPS eine verletzte Elefantenkuh

aufspüren, die von Viehhütern angeschossen wurde.

Immer wieder verweisen die Autoren auf die Rolle der Tier-Telemetrie im Artenschutz – etwa wenn es darum geht, Schutzgebiete einzurichten. In Äthiopien offenbarten erst GPS-Halsbänder, dass die Grenzen eines neuen Nationalparks falsch gezogen waren. In dem ausgewiesenen Gebiet wuchsen nämlich keine Akazien, die Hauptnahrung von Giraffen. Auf der Suche nach Fressbarem begaben sich die Tiere aus diesem Grund immer wieder in ungeschütztes Terrain.

Neben einem Register hätte man sich hin und wieder auch Fotos beschriebener Tierarten gewünscht, die nicht jedem geläufig sein dürften – vom Fischermarder etwa oder vom Tragopan. Bei Letzterem verweisen die Autoren stattdessen auf Youtube – als Suchbegriff „tragopan mating dance“ eingeben und den skurrilen Balztanz dieses Fasanenvogels anschauen; ist wirklich sehenswert!

Das bisher ehrgeizigste Vorhaben auf dem Gebiet der Tier-Telemetrie befindet sich derzeit noch in der Startphase: Im Projekt Icarus unter der Leitung von Martin Wikelski, Direktor am Radolfzeller Max-Planck-Institut für Ornithologie, observieren Forscher die Wanderungen der Tiere vom All aus. Zentrale Schaltstelle ist eine Antenne, die eigens dafür an der Internationalen Raumstation ISS angebracht wird. Man darf hoffen, die künftigen Ergebnisse wieder so ansprechend präsentiert zu bekommen wie in diesem Buch. Elke Maier



Offener Austausch

Wolf Singer, Matthieu Ricard, **Jenseits des Selbst**, Dialoge zwischen einem Hirnforscher und einem buddhistischen Mönch

351 Seiten, Suhrkamp Verlag, Berlin 2017, 25,00 Euro

Ein größerer Gegensatz in der Herangehensweise an Welt und Bewusstsein scheint auf den ersten Blick schwer denkbar: Der eine Gesprächspartner, der Hirnforscher Wolf Singer, repräsentiert die westliche Tradition, die in den historischen Siegeszug der Naturwissenschaften und der Technik, die Beherrschung der Natur, mündete. Dies scheint politisch und sozial einherzugehen mit Egoismus und Individualismus.

Der andere Gesprächspartner, der Mönch Matthieu Ricard, vertritt die östliche, meditativ-introspektive Denkweise, welche den tibetischen Buddhismus prägt und auf eine Beherrschung des Geistes als reiner, inhaltsleerer Gewahrksamkeit abhebt: Das Selbst löst sich so in Nichts auf. Gibt es hier eine Konvergenz der Zugangsweisen und eine Überschneidung der Ergebnisse? Oder sind es Parallelen, die sich erst im Unendlichen schneiden, unerreichbar für das empirische Bewusstsein?

In sechs Kapiteln kreisen die beiden Protagonisten um das Verständnis des Selbst von ihren unterschiedlichen Stand-

punkten. Zentrales Anliegen des Buddhismus ist es, Verdrängung und Entfremdung aufzuheben – eine von Illusionen und Selbstzweifeln befreite Sicht auf das eigene Selbst. Die Befreiung von Illusionen und ein realistisches Bild der Welt und von sich selbst zu gewinnen, ist der aus der Aufklärung stammenden Bewegung der modernen Naturwissenschaften ebenso inhärent. In ethischer Hinsicht könnten sich Ricard und Singer daher wohl auf den Albert Einstein zugeschriebenen Satz einigen: „Die einzig wirklichen Feinde eines Menschen sind seine eigenen negativen Gedanken.“

Bei den vielfältigen Sachthemen kann Matthieu Ricard es durchaus mit Wolf Singer aufnehmen, er ist gut informiert über den aktuellen Diskurs von Hirnforschung, Psychologie und Philosophie – und fungiert häufig als Stichwortgeber im Fortgang des Gesprächs. Singer aber, in seiner nüchternen und höchst reflektierten Art, kontert mit methodischen Fragen und kluger Rücksicht dort, wo sich Ricards religiöse und metaphysische Überzeugtheit manifestiert – bei Phänomenen etwa, die

als Gedankenübertragung keiner plausiblen Erklärung zugänglich sind.

Das gemeinsame „Jenseits“ im „Jenseits des Selbst“ verweist allerdings keineswegs auf eine metaphysische Dimension, sondern auf Bedingungen für die Sozialität menschlicher Existenz. Der Mönch und der Neurowissenschaftler sind sich einig in der Begründung, in einer Art ontologischem Monismus – also der Sichtweise, die auf einen grundlegenden Zusammenhang als Basis und Realität unserer Welt baut. Wobei Singer einen materialistisch-naturalistischen Monismus im Sinn hat, während Ricard einen geistigen Monismus meint.

Die Lektüre des Buches lohnt sich nicht nur für Fachleute. Der naturwissenschaftlich vorgebildete buddhistische Mönch und der naturalistisch argumentierende, humanistisch gebildete Neurowissenschaftler zeigen sich in ihrer Geisteshaltung sehr ähnlich. Dies erlaubt es beiden, einander bei einzelnen Themen sachlich klar und deutlich zu widersprechen und nicht auf einem einheitlichen Ergebnis zu beharren, sondern das Gespräch offen zu führen und auch so enden zu lassen. Peter M. Steiner

Weitere Empfehlungen

- Ralf Jaumann, Ulrich Köhler, Frank Sohl, Daniela Tirsch, Susanne Pieth, **Expeditionen zu fremden Welten**, 20 Milliarden Kilometer durch das Sonnensystem, 380 Seiten, Springer Verlag, Berlin und Heidelberg 2017, 29,99 Euro
- Max Tegmark, **Leben 3.0**, Mensch sein im Zeitalter Künstlicher Intelligenz, 528 Seiten, Ullstein Verlag, Berlin 2017, 26,00 Euro
- Richard von Schirach, **Der Mann, der die Erde wog**, Geschichten von Menschen, deren Entdeckungen die Welt veränderten, 416 Seiten, C. Bertelsmann Verlag, Gütersloh 2017, 22,00 Euro

Standorte

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

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

- Jupiter, Florida

Brasilien

- Manaus

Luxemburg

- Luxemburg



MAX-PLANCK-GESellschaft

Impressum

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

Redaktionsanschrift

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

Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung

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

Redaktion

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

Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)

Gestaltung

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

Litho

KSA Media GmbH
Zeuggasse 7
86150 Augsburg

Druck & Vertrieb

Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg

Anzeigenleitung

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

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

Die **Max-Planck-Gesellschaft** zur Förderung der Wissenschaften unterhält 84 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 23 400 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6 700 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2018 umfasst insgesamt 1,8 Milliarden Euro. Die **Max-Planck-Institute** betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die **Max-Planck-Gesellschaft** ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.

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



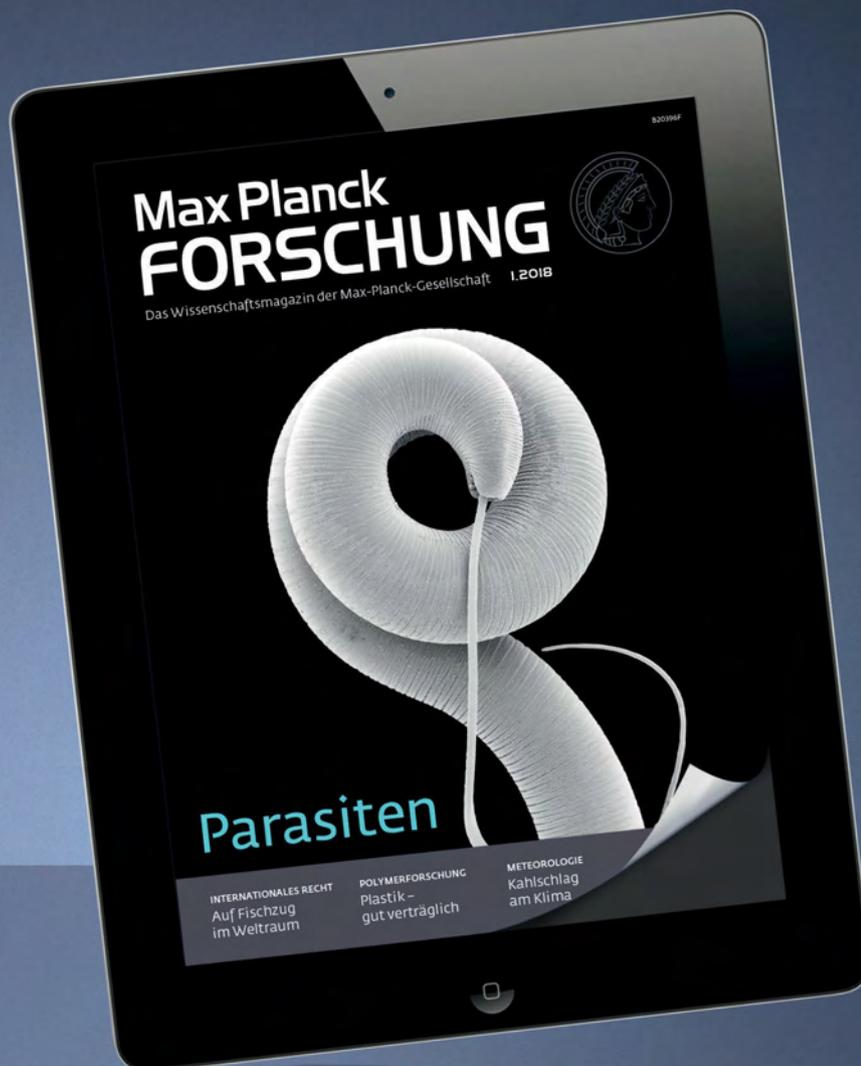
Forschung leicht gemacht.

Schafft die Papierstapel ab!

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

Internet: www.mpg.de/mpforschung

Kostenlos
downloaden!



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT