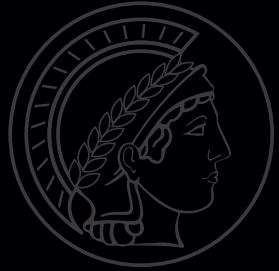
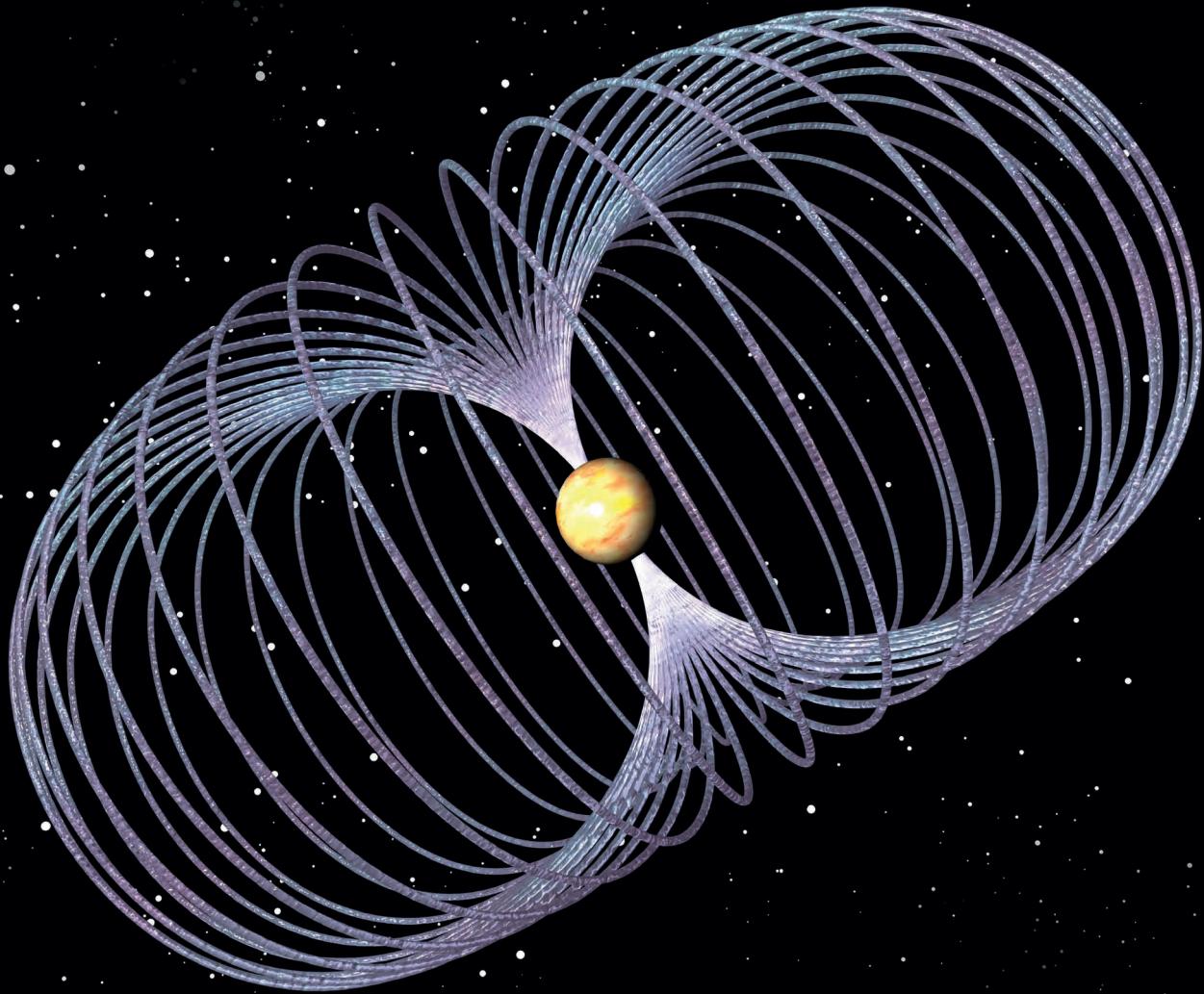


Max Planck FORSCHUNG



Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft **4.2014**



ASTRONOMIE

Kosmische Magnetfelder

UMWELTFORSCHUNG

Das Rundum-Klimapaket

BIOTECHNOLOGIE

Impfung aus dem Reaktor

ÖKOLOGIE

Leben im Wechselbad

GESELLSCHAFT

Grauzone Schwarzmarkt

Alternative Karrierewege für Wissenschaftler – gibt es die?

Auch auf der wissenschaftlichen Laufbahn muss es nicht immer geradeaus gehen. Schauen Sie nach links und rechts. Wir unterstützen Sie dabei mit aktuellen Stellenangeboten und Ratgeberinformationen.

**Die Antworten
finden Sie auf
academics.de!**

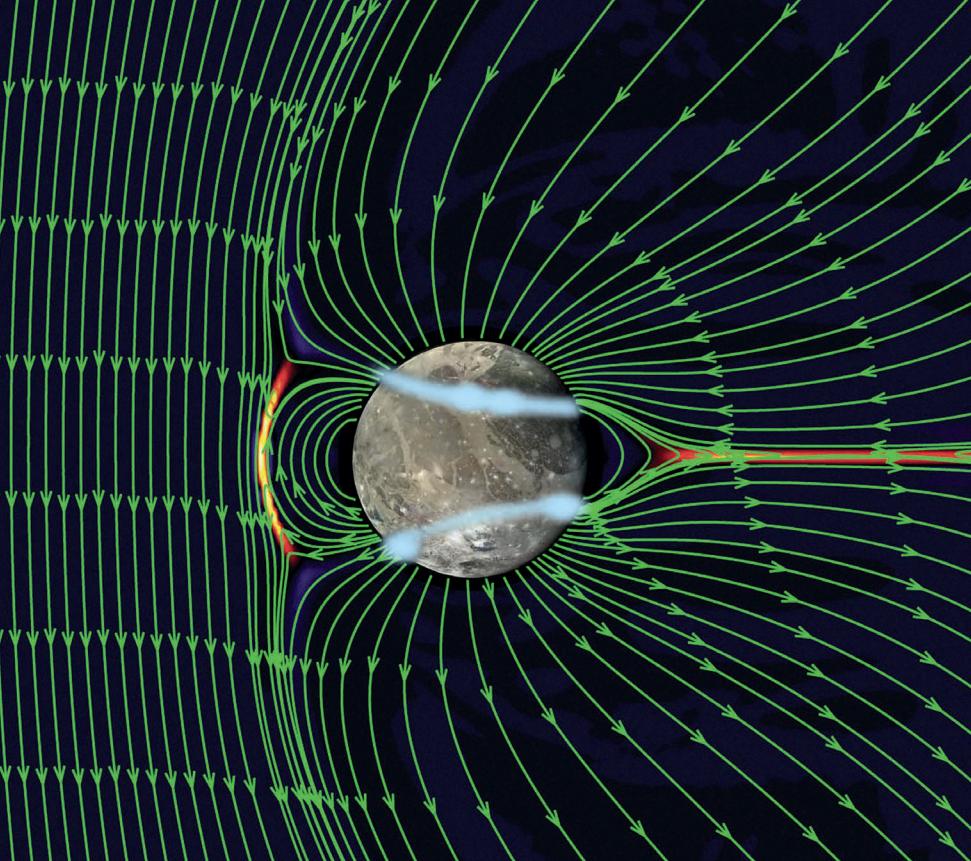
 **academics.de/maxplanck**
Das Karriereportal für Wissenschaft & Forschung



Für immer sprachlos?

Weltweit werden derzeit etwa 7000 Sprachen gesprochen. Nicht wenige davon sind akut bedroht: Sie werden nur noch von einem kleinen Personenkreis gesprochen und nicht mehr an nachfolgende Generationen weitergegeben. Wissenschaftler gehen deshalb davon aus, dass am Ende des 21. Jahrhunderts noch höchstens ein Drittel – vielleicht aber auch nur noch ein Zehntel – der heute gesprochenen Sprachen existieren werden. Der Wert, den Menschen ihrer eigenen Sprache beimessen, hängt stark von sozialen und wirtschaftlichen Gegebenheiten ab. Besonders bedroht sind Sprachen von Bevölkerungsgruppen, die eine nur geringe soziale Reputation besitzen. Doch was noch schlimmer ist: Mit jeder sterbenden Sprache gehen auch kulturelle und intellektuelle Eigenheiten verloren.

Um gefährdete Sprachen und Dialekte zumindest zu dokumentieren und für die Nachwelt – und auch für künftige Forscher – zu erhalten, wurde im Jahr 2000 das DOBES-Programm ins Leben gerufen. Im Rahmen des Projekts forschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Psycholinguistik in vielen Gebieten auf der ganzen Welt. Im Norden Namibias etwa gilt ihr Interesse der Khoisan-Sprache #Akhoe Haillom, die viele Klick-Laute beinhaltet. Diese werden in der Standardorthografie durch die Zeichen !, I, II und # dargestellt. Zur Vorbereitung eines Workshops über Minderheitensprachen im südlichen Afrika führt eine lokale Mitarbeiterin des Projekts, die Lehrerin Mariane Kheimses, ein Interview mit Abakup IIGamIgaeb über seine Ansichten und Einstellungen zu seiner Muttersprache. Die Mitglieder der Gemeinschaft konnten sich nämlich nicht vorstellen, bei der Tagung nur einen einzigen Repräsentanten für alle sprechen zu lassen. Daher wurde beim Workshop statt eines Vortrags eine Reihe von Videointerviews gezeigt. So waren alle möglichen Meinungen vertreten.



Inhalt



18 ASTRONOMIE

Kosmische Magnetfelder

18 Schutzhilfe im Sonnensystem

Im Planetensystem können Magnetfelder von Schnee aus Eisen und metallischem Wasserstoff angetrieben werden. Ihre Vermessung eröffnet Einblicke in die Prozesse, die das Innenleben der Planeten verändern. Die Vielfalt dieser Magnetfelder untersucht Ulrich Christensen, Direktor am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen.

26 Sterne mit großer Anziehung

Sie gehören zu den exotischsten Objekten im All: Neutronensterne. Unvorstellbar dicht und nur 20 Kilometer groß, rotieren sie rasend schnell um ihre Achsen, wobei sie Strahlungskegel in den Raum senden. Manche dieser kosmischen Leuchttürme haben besonders starke Magnetfelder. Michael Gabler vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching studiert diese Magnetare – und lernt so einiges über deren Beschaffenheit.

34 Kräfte, die in Galaxien walten

Magnetfelder durchziehen auf Größenskalen von 100 000 Lichtjahren ganze Galaxien und umgeben deren zentrale Schwarze Löcher. Forscherinnen und Forscher um Rainer Beck, Silke Britzen und Sui Ann Mao am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn entlocken den unsichtbaren Kraftfeldern ihre Geheimnisse.

ZUM TITEL Man kann sie nicht sehen, aber sie sind im wörtlichen Sinne allgegenwärtig: Magnetfelder. Sie existieren um Planeten, durchziehen unsere Milchstraße und stecken nicht nur im galaktischen Gas, sondern finden sich auch in den daraus geformten Sonnen. Und Magnetare, nur etwa 20 Kilometer durchmessende Neutronensterne, haben die stärksten Magnetfelder im Universum. Die künstlerische Darstellung zeigt die für Fernrohre unsichtbare Ästhetik eines solch exotischen Objekts.

10 Gewappnet: Spezielle Dienste sollen helfen, auf die Folgen des Klimawandels zu reagieren.

PERSPEKTIVEN

- 06 Für einen sachlichen Diskurs über Tierversuche
- 07 Neues Labor in Argentinien eröffnet
- 08 Freundschaft fürs Leben
- 08 Animal Tracker gewinnt Preis für Bürgerbeteiligung
- 09 Netzwerken für den Technologie-transfer
- 09 Ins Netz gegangen

ZUR SACHE

- 10 **Das Rundum-Klimapaket**
Die Erderwärmung verändert die Welt. Klimadienste wollen Entscheidungsträger im öffentlichen Dienst, in Unternehmen und in der Politik helfen, auf den vielfältigen Wandel angemessen zu reagieren.

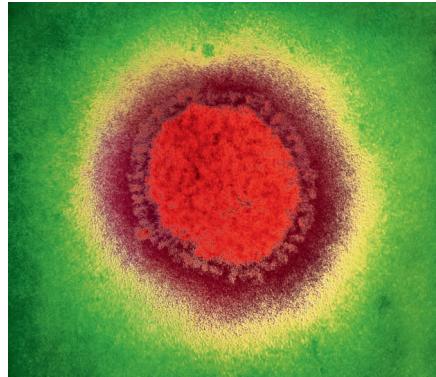
FOKUS

- 18 Schutzhilfe im Sonnensystem
- 26 Sterne mit großer Anziehung
- 34 Kräfte, die in Galaxien walten



48

Gewieft: Elena Conti erstellt Bilder von lebensnotwendigen molekularen Maschinen.



54

Gewandelt: Das Grippevirus ändert sich ständig, daher braucht man immer wieder neue Impfstoffe.



70

Gewildert: Rhinozeroshorn ist sehr begehrte und wird auf dem Schwarzmarkt zu horrenden Preisen gehandelt.

SPEKTRUM

- 42** Mikromuschel für die Medizin
- 42** Magnetfelder als Geburtshelfer der Sterne
- 43** Die dunklen Finger der Sonne
- 43** Kollision der Galaxienhaufen
- 43** Bloß kein Außenseiter sein!
- 44** Mehr Kitas bringen nicht immer mehr Kinder
- 44** Zweisamkeit im menschlichen Erbgut
- 45** Erst mal sehen
- 45** Die Choreografie eines Elektronenpaars
- 46** Vertrauensbildende Maßnahmen
- 46** Übergewicht – wie der Vater so der Sohn
- 47** Nanolampe mit blitzschnellem Schalter
- 47** Supraleitung ohne Kühlung
- 47** Gehirnjogging am Computer hält nicht, was es verspricht

BIOLOGIE & MEDIZIN

- 48** **Architektin im Zellkosmos**
Zur Person: Elena Conti

MATERIAL & TECHNIK

- 54** **Impfung aus dem Reaktor**
Wenn eine weltumspannende Pandemie durch Grippeviren droht, könnte die Impfstoffproduktion an ihre Grenzen kommen. Wissenschaftler erforschen daher eine vollautomatische Produktion in Zellkulturen, die im Krisenfall Impfstoff in großer Menge liefern soll.

UMWELT & KLIMA

- 62** **Leben im Wechselbad**
Der Klimawandel beeinflusst die Tier- und Pflanzenwelt tiefgreifend. Das liegt nicht nur an dem weltweiten Anstieg der Durchschnittstemperaturen, sondern auch an veränderten Temperaturschwankungen, sowohl zwischen Tag und Nacht als auch zwischen Sommer und Winter.

KULTUR & GESELLSCHAFT

- 70** **Grauzone Schwarzmarkt**
Produktfälschungen in Argentinien, Abbau und Handel mit Diamanten in Sierra Leone, Rhinozeroshorn oder Finanzmarktkriminalität – das sind Themen, mit denen sich Wissenschaftler in einem innovativen, wirtschaftssoziologischen Projekt befassen.

RUBRIKEN

- 03** **Orte der Forschung**
- 16** **Post nach – Teheran, Iran**
Das Leben berechenbarer machen
- 78** **Rückblende**
Der Schlossteich im Becherglas
- 80** **Neu erschienen**
- 80 Alexander Pschera,
Das Internet der Tiere
- 81 Mario Markus,
Unsere Welt ohne Insekten?
- 82 Das Rätsel der Dunklen Materie, DVD
- 83** **Standorte**
- 83** **Impressum**

Für einen sachlichen Diskurs über Tierversuche

Seit der Ausstrahlung zweifelhafter Videoaufnahmen in der Sendung *stern TV* im September 2014 sieht sich das Tübinger Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik einer haltlosen Schmähkritik ausgesetzt. Max-Planck-Präsident Martin Stratmann hatte sich daher bereits im Dezember mit einem Namensbeitrag im *SCHWÄBISCHEN TAGBLATT* zu Wort gemeldet. Im Folgenden tritt er für einen sachlichen Diskurs zu tierexperimenteller Forschung ein.



Martin Stratmann, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft

Die Hirnforschung ist eine der erfolgreichsten wissenschaftlichen Unternehmungen. Über Jahrhunderte gab es weitreichende anatomische Studien. Sie offenbarten den Gelehrten viele Details über die Struktur, aber eben keinerlei Information über die Funktionsweise des Gehirns. Dies bedurfte – und bedarf auch weiterhin – des Experiments am Tier.

Im 18. Jahrhundert ergaben sich durch die Untersuchung von Funktionsausfällen bei Patienten mit örtlich umgrenzten Hirnverletzungen erste wertvolle Hinweise auf funktionale Areale im Gehirn. Ihre Beobachtung ermöglichte aber keine systematische Erfassung dieser Hirnareale. Das gelang erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts – und zwar durch Experimente an Affen.

Wenn wir heute einen Patienten in die Röhre eines Magnetresonanztomografen schieben, dann greifen wir auf

dieses Wissen zurück, das in den vergangenen 100 Jahren immer weiter ausgebaut wurde. Auch durch die Forschung am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in der Abteilung von Nikos Logothetis.

Der renommierte Neurobiologe konnte mit seinen Arbeiten eine wertvolle Brücke schlagen vom Tierversuch hin zu den am Menschen gewonnenen Befunden. Denn ihm und seinem Team ist es erstmals gelungen, elektrische Ableitungen an einzelnen Nervenzellen mit der funktionellen Magnetresonanztomografie (fMRI) zu kombinieren. Die Tierversuchsgegner irren, wenn sie behaupten:

„Die heutigen Technologien erlauben den Forschern, das Gehirn bis ins kleinste Detail zu untersuchen – ohne Löcher in den Schädel zu bohren. Mit modernen bildgebenden Verfahren wie der Magnetresonanztomografie kann die Verarbeitung von Nervenreizen im Gehirn von Freiwilligen untersucht werden.“

Das stimmt schlachtweg nicht. Die funktionelle Magnetresonanztomografie macht aktive Hirnareale sichtbar, weil diese mehr Sauerstoff und Blut benötigen. Sie misst Sauerstoffsättigung und Fluss des Blutes – nicht aber die eigentliche elektrische Aktivität der Nervenzellen. Die daraus gezogenen Schlussfolgerungen ignorieren häufig die realen Grenzen der Methode.

So lässt sich die Stärke des fMRI-Signals nicht so quantifizieren, dass sie Unterschiede zwischen Gehirnregionen

oder zwischen Aufgaben innerhalb derselben Region exakt widerspiegelt. Der von Logothetis entwickelte kombinierte Untersuchungsansatz ermöglicht es, die Interpretation von fMRI-Daten maßgeblich zu verbessern. Und das ist von erheblicher Bedeutung, etwa für die Neurochirurgie.

Nun ist es nicht so, dass um das Für und Wider tierexperimenteller Forschung nicht schon in früheren Zeiten gerungen wurde. Britische Tierschützer setzten 1876 erstmals eine gesetzliche Regulierung wissenschaftlicher Tierversuche durch. Aber es ist eben auch gut zu wissen, dass auf der Grundlage der damaligen, an Affen gewonnenen Erkenntnisse 1879 die erste erfolgreiche Operation zur Entfernung eines Hirntumors vorgenommen wurde.

Ich bin überzeugt, dass wir die Notwendigkeit tierexperimenteller Forschung immer wieder gut begründen müssen. Dabei befinden wir uns in einem ethischen Dilemma. Denn abzuwagen ist zwischen dem Leid des Tieres und dem Leid von Menschen. Tierversuche sollen dazu beitragen, menschliches Leid zu vermeiden oder eben zumindest zu lindern. Ein vorsätzlicher Verzicht auf Untersuchungen an Tieren käme dem vorsätzlichen Verzicht gleich, Behandlungsverfahren für die vielen noch nicht beherrschbaren, insbesondere neurodegenerativen und psychiatrischen Erkrankungen entwickeln zu wollen.

Die aktuelle Kampagne gegen das Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik lässt jedoch gar keinen sachlichen Diskurs zu. Keine der von dem als Tierpfleger eingeschleusten Tierschutzaktivisten heimlich aufgezeichneten Filmaufnahmen zeigt den Normalzustand in der Tierhaltung am Institut. Und es gibt inzwischen eine Reihe von Indizien, dass Bilder durch Manipulation der Tiere oder ihres Um-

felds provoziert oder mit falschen Erläuterungen versehen wurden – einzig und allein zu dem Zweck, Tierversuche zu diskreditieren und die Spendenbereitschaft vermeintlicher Tierliebhaber zu befördern.

Diese treten mit großer Intensität und teilweise intoleranter Aggressivität für die Ideen des organisierten Tierschutzes ein. Sie äußern sich via Mail oder in den sozialen Medien, ohne ihre Identität preiszugeben, und offenbaren auf erschreckende Art und Weise eine Geisteshaltung, die mich an das dunkelste Kapitel der deutschen Geschichte erinnert. Es sind Mails mit Zeilen wie diese: „Schade, dass es keine Menschenversuche gibt, ihr wärt die besten Kandidaten dafür...“

Hier wird offensichtlich: Diejenigen, die angeblich Tiere vor Leid schützen wollen, haben keine Skrupel, Menschen

Leid anzudrohen; und sie schützen sich vor Strafverfolgung durch Anonymität. Daher bin ich wirklich dankbar dafür, dass auch namhafte Politiker das Institut unterstützt haben und diesen Schmähungen öffentlich entgegentreten sind.

Die Vorwürfe gegen das Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik wurden von den verantwortlichen Behörden in den vergangenen Monaten gründlich geprüft. Ein Zwischenergebnis bestätigt die Rechtmäßigkeit der Versuche. Sie unterliegen einem strengen Genehmigungsverfahren im Rahmen des deutschen Tierschutzgesetzes: Die Experimente werden nach wissenschaftlichen und ethischen Kriterien sorgfältig geprüft, und die Genehmigungen unterliegen strengen gesetzlichen Auflagen, deren Einhaltung behördlich überwacht wird. Versuche – insbeson-

dere mit Affen – dürfen überhaupt nur durchgeführt werden, wenn es keine Alternative gibt und die wissenschaftliche Fragestellung einen bedeutenden Erkenntnisgewinn verspricht.

Darüber hinaus können wir dem hohen Anspruch an die Wissenschaft nur bei einem sachgerechten Umgang mit den Tieren entsprechen. Bei den Versuchen zur Untersuchung kognitiver Prozesse am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik bedeutet das, dass sich die Tiere in einem stabilen und gesunden Zustand befinden müssen, sie nicht willkürlich unter Hunger oder Durst und schon gar nicht unter Angst oder Schmerzen leiden dürfen. Erkenntnisse, die unter solchen Umständen gewonnen würden, wären für allgemeingültige Aussagen unbrauchbar. Kein ernst zu nehmender Wissenschaftler würde sich dafür hergeben!

Neues Labor in Argentinien eröffnet

Kooperationsprojekt sucht nach Wirkstoffen gegen Alzheimer und Parkinson

Die Max-Planck-Gesellschaft hat ihre Präsenz in Argentinien ausgebaut. Nach dem 2011 eröffneten Partnerinstitut für Biomedizin in Buenos Aires wurde nun im November 2014 das Max-Planck-Laboratorium für Strukturbioologie, Chemie und molekulare Biophysik in Rosario eingeweiht. Das Labor ist ein Kooperationsprojekt des Max-Planck-Instituts für biophysikalische Chemie in Göttingen und der Universidad Nacional de Rosario. Es befindet sich auf dem Universitätscampus von Rosario, der drittgrößten argentinischen Stadt, 300 Kilometer nordwestlich von Buenos Aires. Mithilfe eines hochmodernen Magnetresonanzeräts können die Forscher dort die Struktur von Biomolekülen direkt im Innern von Zellen untersuchen.

Die Fachleute wollen Wirkstoffkandidaten für neurodegenerative Krankheiten wie Alzheimer und Parkinson identifizieren. Insgesamt wurden rund 30 Millionen Pesos (etwa 2,8 Millionen Euro) in das Gebäude und seine Labor- und Geräteausstattung in-

vestiert. Laborleiter ist der argentinische Wissenschaftler Claudio Fernández. Er leitete zuletzt im Rahmen des Partnerprogramms der Max-Planck-Gesellschaft eine Forschungsgruppe.



Offizielle Einweihung: Darío Maiorana, Rektor der Universidad Nacional de Rosario, Jorge Capitanich, Kabinettschef der argentinischen Regierung, Juan Manzur, Gesundheitsminister, Lino Barañao, Minister für Wissenschaft, Forschung und Technologie, sowie Claudio Fernández, der Leiter des neuen Labors (von links).

Freundschaft fürs Leben

Alumni gründen Max-Planck-Freundeskreise in vier Ländern



Die Initiatoren: Albert Presas i Puig (sitzend), Javier Ordóñez, Jürgen Renn sowie José M. Pacheco (von links) am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte.

Alumnibetreuung, etwa in Form von Vereinen für ehemalige Mitarbeiter oder Einladungen zu Institutsfeiern, gibt es an den Max-Planck-Instituten schon seit Längerem. Doch die enge Verbundenheit mit der Max-Planck-Gesellschaft verliert sich oft, wenn die Forschenden ihre Karriere anderswo weiterführen – egal, ob in der Wissenschaft oder in der Industrie. „In einem Freundeskreis können wir mehr erreichen, nämlich den Namen und die Werte der Max-Planck-Gesellschaft stärker in unseren Heimatländern bekannt machen“, sagt Albert Presas i Puig, Initiator von „Amics de la Sociedad Max Planck“.

Der ehemalige Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Wissenschaftsgeschichte hat im September 2014 zusammen mit weiteren Alumni und einem der Direktoren, Jürgen Renn, den Freundeskreis in Spanien gegründet. Presas i Puig hat konkrete Ideen, wie der Verein seine Ziele erreicht: „Wir können etwa Symposien mit Universitäten und örtlichen Forschungseinrichtungen organisieren oder auch Hinzugezogenen beim Einleben helfen.“ Inzwischen haben drei weitere Freundeskreise in Argentinien, Südkorea und Kalifornien das Konzept der spanischen Alumni aufgegriffen.

Animal Tracker gewinnt Preis für Bürgerbeteiligung

Die ausgezeichnete App beteiligt Laien an der Arbeit der Max-Planck-Ornithologen

Direktor Martin Wikelski vom Max-Planck-Institut für Ornithologie in Radolfzell und sein Team haben die Jury des „Citizen Science“-Wettbewerbs zum Wissenschaftsjahr 2014 überzeugt: Mit der App der Vogelkundler kann jeder Interessierte Tierwanderungen verfolgen und sogar selbst zur Forschung beitragen.

Wissenschaftler versehen Vögel und andere Wildtiere mit Sendern, deren Aufenthaltsorte mittels GPS erfasst werden. Eine Onlinedatenbank dokumentiert die zurückgelegten Strecken.

Wer den Animal Tracker auf sein Smartphone lädt, kann nicht nur die Routen der Tiere in der Datenbank nachvollziehen. Ortet man eines von ihnen in der Nähe, kann man den Wissenschaftlern wertvolle Zusatzinformationen liefern: Frisst das Tier und, wenn ja, was? Ist es allein oder begleitet von Artgenossen? Eigene Beobachtungen und Fotos lassen sich mit der App direkt hochladen. So kann jeder Bürger aktiv die wissenschaftliche Arbeit unterstützen – das ist die Idee von „Citizen Science“.

Der Wettbewerb, der jährlich von der Initiative Wissenschaft im Dialog, dem Berliner Museum für Naturkunde und dem Bundesforschungsministerium ausgeschrieben wird,



Die App macht's möglich: Laien können wertvolle Informationen zur Forschung beisteuern – etwa, wie viele Störche hier gemeinsam rasten.

möchte Wissenschaftler ermutigen, Laien mittels digitaler Medien in ihre Forschung einzubeziehen. Die Gewinner erhalten ein professionell erstelltes Video, um ihr Projekt noch bekannter zu machen.

Netzwerken für den Technologietransfer

Münchener Innovation Days brachten Wissenschaft und Wirtschaft zusammen



Neben Vorträgen und Diskussionen ließen die Innovation Days viel Raum, um neue Kontakte zu knüpfen.

diese letztlich umsetzen“. Genau dafür boten die Innovation Days ein Forum. Zum Programm gehörten unter anderem Best-Practice-Beispiele für gute Zusammenarbeit, eine Veranstaltung zur Start-up-Finanzierung sowie eine Podiumsdiskussion über *Open Innovation*, an der sich auch Max-Planck-Direktor Dietmar Harhoff beteiligte. Kern der Tagung war die Präsentation von 40 ausgewählten Forschungsprojekten mit Potenzial für Anwendungen. Dabei stellten auch 13 Max-Planck-Vertreter ihre Arbeit vor.

Die jährlich stattfindenden Innovation Days fördern den Transfer von Forschungsergebnissen in die Anwendung sowie eine stärkere Vernetzung zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Die Federführung lag dieses Mal bei Max-Planck-Innovation, dem Dienstleister für Technologietransfer in der Max-Planck-Gesellschaft.

Eröffnet wurde das zweitägige Treffen Anfang Dezember 2014 in der Münchener Innenstadt von Max-Planck-Präsident Martin Stratmann. Er betonte in seiner Rede, wie wichtig es sei, „nicht nur sehr abstrakt Technologien und Unternehmen zusammenzubringen, sondern die Menschen, die

Ins Netz gegangen



Tuning für Brennstoffzellen

Brennstoffzellen können klimaschonend Strom erzeugen, vor allem wenn sie mit Wasserstoff aus Biomasse wie Holzabfällen oder Stroh betrieben werden. Biologisch gewonnener Wasserstoff ist jedoch mit Spuren von Kohlenmonoxid verunreinigt. Um damit klarzukommen, benötigen Brennstoffzellen eine ausgeklügelte Steuerung. Unser neuer Film erklärt einfach und anschaulich, wie dies funktionieren kann und was unsere Wissenschaftler dazu beitragen.

youtube.com/maxplancksociety

Hundekunde online

Immer wieder wird Marie Nitzschner gefragt: „Wie intelligent sind Hunde eigentlich?“ Die junge Verhaltensbiologin forscht seit acht Jahren am Leipziger Max-Planck-Institut für evolutive Anthropologie und hat dort über „Hund-Mensch-Kooperation“ promoviert. Jetzt bloggt Marie Nitzschner für die NEUE ZÜRCHER ZEITUNG (NZZ). Im Blog *HundeKunde* widmet sich die Hundebesitzerin seit Anfang Januar dem liebsten Gefährten des Menschen und seinen kognitiven Fähigkeiten. hundekunde.blog.nzz.ch

Die Sprachen der Welt

Der Verlag De Gruyter stellt sämtliche bibliografischen Daten aus seinem sprachwissenschaftlichen Programm für die Datenbank Glottolog zur Verfügung. Diese Datenbank, die von der Max-Planck-Gesellschaft gefördert wird, bietet freien Zugang zu wissenschaftlichen Informationen über die Sprachen der Welt. Der erste Datentransfer mit rund 4000 Büchern und 5000 Zeitschriften ist so gut wie abgeschlossen. Darüber hinaus werden alle künftigen Titel in die Datenbank integriert. glottolog.org

Das Rundum-Klimapaket

Die Erderwärmung verändert die Welt – ökologisch, ökonomisch und politisch. Klimadienste wollen Entscheidungsträgern helfen, auf den vielfältigen Wandel angemessen zu reagieren. Unsere Autoren waren maßgeblich am Aufbau des **Climate Service Center** in Hamburg beteiligt. Im Folgenden stellen sie die Arbeit dieser Art von Einrichtungen vor und schildern die Herausforderungen für die Kommunikation.

TEXT GUY BRASSEUR UND IRENE FISCHER-BRUNS

Die Forschung zum Klimawandel ist insbesondere seit dem Jahr 2000 beträchtlich fortgeschritten. Ende des 20. Jahrhunderts begann man, die Ursachen der beobachteten Klimaänderungen so weit zu verstehen, dass sich der Einfluss menschlicher Aktivitäten beurteilen ließ. In jüngster Zeit hat sich der Fokus auf die Abschätzung der Folgen verschoben, die der Klimawandel für die gekoppelten natürlichen und sozialen Systeme haben wird.

Der Trend geht zu regionalen Aussagen über die Folgen der Erderwärmung

Damit sind neue Themen zu zentralen Anliegen der wissenschaftlichen Diskussion geworden, was eine Einbeziehung der Sozialwissenschaften erfordert. Sie beinhalten Fragen zu physikalischen und sozialen Verwundbarkeiten gegenüber dem Klimawandel, zur

Fähigkeit, diesen Belastungen nachhaltig standhalten zu können, und zur Wahl zwischen Anpassungs- und Vermeidungsstrategien. Auch der Ruf nach Klimavorhersagen für einzelne Jahreszeiten, Jahre und wenige Jahrzehnte wird lauter – eine Forderung, welche die Wissenschaft nach heutigem Stand erst für grobe Jahreszeitenprognosen in niederen geografischen Breiten und nur zum Teil erfüllen kann.

Verlässliche Klimainformationen, die auf den aktuellsten Forschungsergebnissen basieren, benötigen die Führungskräfte in Politik, öffentlichem Dienst und Privatwirtschaft, um informierte Entscheidungen hinsichtlich der Anpassung an den Klimawandel treffen zu können. Die Wissenschaft ist sich dessen durchaus bewusst und trägt daher zur Erstellung detaillierter Klimaberichte bei, etwa denen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Diese Berichte sind politikrelevant und bilden die Wissensbasis der internationalen Verhandlungen wie für die UN-Klimarahmenkonvention. Ihre Erstellung nimmt jeweils einige Jahre in Anspruch.

Die Aufgabe des Wissenstransfers ist nicht leicht, da sie oft im Kontext von Interessenskonflikten gelöst werden muss. Die Sichtweisen der Wissenschaftler



und der gesellschaftlichen Akteure lassen sich häufig nicht miteinander vereinbaren. Selbst wenn die Datenproduktion durch die Wissenschaftsgemeinde ausreicht und die Nutzer fachkundig sind, gibt es doch große Lücken auf den Gebieten Datenintegration, -analyse und -auswertung sowie bei der Übersetzung der Ergebnisse in einen fachfremden Kontext.

So ist auch das IPCC-Wissen nur von begrenztem Nutzen, beispielsweise für regionale Unternehmen, Städte und Gemeinden sowie für die breite Öffentlichkeit. Der IPCC erarbeitet in erster Linie global relevante, wissenschaftliche Informationen; diese basieren auf globalen Modellprojektionen. Jedoch geht der Trend auch beim IPCC allmählich zu regionalen Aussagen über Klimafolgen, Verwundbarkeit und Anpassung. Und es wurde die Entwicklung eines dezentralisierten Mechanismus vorgeschlagen, der dem Bedarf der Entscheidungsträger mehr Rechnung trägt. Er muss sicherstellen, dass sich das Forschungswissen und das lokale Wissen der Entscheidungsträger – entstanden aus langjährigen Erfahrungen – ergänzen. Diesen Mechanismus umsetzen können Klimadienste wie etwa das Climate Service Center in Hamburg.

Schon im Jahr 2001 hatte der Nationale Forschungsrat (NRC) der Amerikanischen Akademie der Wissenschaften den Klimaservice definiert als „the

Die öffentliche Meinung hat großen Einfluss auf die Entscheidungen der Politik

timely production and delivery of useful climate data, information and knowledge to decision makers“ (die zeitnahe Produktion von Klimadaten, -informationen und -wissen und deren Kommunikation an Entscheidungsträger). In dem Bericht heißt es, dass ein verbessertes Informationsmanagement vonnöten sei, um die Maßnahmen im Zusammenhang mit dem Klimawandel vorantreiben zu können.

In einem späteren Bericht empfiehlt der NRC die Entwicklung eines umfassenden Treibhausgas-Monitoring- und -Managementsystems, koordiniert durch Klimaservice-Einrichtungen. Auch hier wurde der Ruf nach maßgeschneiderten Informationen laut, die den gesellschaftlichen Gruppen zur Verfügung stehen müssten. Zu den Schlüsselfunktionen von Klimadiensten gehören nach Aussage des NRC der Ausbau von

Beobachtungssystemen, die verstärkte Entwicklung von Verwundbarkeitsanalysen auf regionaler Skala, die nachhaltige Interaktion aller beteiligten Akteure, eine neue Art von Forschung zur Bedarfsermittlung und eine geeignete Kommunikationsstrategie.

Die Aufgabe von Klimadiensten geht also weit über die reine Wissensproduktion hinaus. Sie besteht in der Entwicklung von Produkt-Prototypen. Darunter sind neue, in Koproduktion mit dem Nutzer entwickelte, forschungsbasierte und maßgeschneiderte Informationen und Methoden zu verstehen, die gemeinsam auf ihre Praxistauglichkeit erprobt werden. Sie unterstützen die Entscheidungsfindung, etwa bei Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel.

Die Produkt-Prototypen entstehen top-down, erfordern aber auch einen intensiven Austausch (bottom-up) mit den betroffenen Interessengruppen; auf diese Weise können Erfahrungen aus der Praxis mit einfließen. Der Top-down-Ansatz geht von Klimaprojektionen aus und berücksichtigt die dazugehörigen Unsicherheiten. Der Bottom-up-Ansatz nimmt Bezug auf Analysen zur Auswirkung des Klimawandels auf die sozioökologischen Systeme. Die innovative Aufgabe von Klimadiensten besteht darin, die beiden Ansätze zusammenzubringen.

Klimadienste können somit ein Defizit der Vergangenheit beseitigen. Denn die Kommunikation des Wissens zum Klimawandel ist in den zurückliegenden Jahrzehnten oft fehlgeschlagen. Obwohl die Wissenschaft robuste Aussagen zu wichtigen Fragen des Klimawandels treffen und diese auch breit streuen konnte (etwa über die IPCC-Berichte und deren Zusammenfassung für Entscheidungsträger), bleiben viele Entscheider skeptisch und zeigen keine Anzeichen, ihren bisherigen Kurs in Richtung einer Anpassung an den Klimawandel zu ändern.

Es gibt einige Gründe für diesen ineffizienten Prozess. Erstens stellen einzelne Wissenschaftler immer wieder kritische Fragen, die – wenn sie sich als begründet herausstellen – Schlussfolgerungen modifizieren können. Ein durchaus gesunder Prozess und in vielen Disziplinen üblich. Wissenschaftlich begründete Zweifel haben schon oft neue Wege der Forschung eröffnet und so zum Erfolg geführt. Zweitens gibt es politisch motivierte Personen, welche die von der Wissenschaft kommunizierten Unsicherheiten unverhältnismäßig aufbauschen. Ihr Ziel ist es, „orchestrierte Kampagnen“ zu entwickeln, welche die Qualität der Arbeit und Integrität der internationalen Wissenschaftsgemeinde bezweifeln – oft



mit der finanziellen Unterstützung großer internationaler Konzerne und politisch motivierter Gruppen.

Schließlich gerät die Presse auf der Suche nach kontroversen Schlagzeilen immer wieder in Versuchung, das Gewicht von Aussagen der großen Mehrheit internationaler Wissenschaftler gleichwertig mit oft unbegründeten Aussagen nur weniger gleichzusetzen. Dies ruft große Verwirrung in der Öffentlichkeit hervor, die weder in der Lage ist, alle wissenschaftlichen Fakten gegeneinander abzuwägen noch eine detaillierte Analyse der Qualität der verbreiteten Informationen vorzunehmen.

Die öffentliche Meinung beeinflusst stark die Entscheidungsfindung in der Politik. Die Bürger sind am Thema Klimawandel durchaus interessiert, sind sie doch oft auch direkt von ihm betroffen. Ihre Ansichten dazu hängen entscheidend von den Aussagen der Wissenschaftler ab, aber nicht ausschließlich. Denn jeder wird auch maßgeblich von gesellschaftlichen, insbesondere religiösen und familiären Werten sowie seiner Persönlichkeitsstruktur geprägt. Gleichermaßen wird ihre Sichtweise von den jeweils herrschenden sozialen Strukturen, politischen Systemen und ökonomischen Werten beeinflusst. Darüber hinaus erhalten sie von den Medien verwirrende Botschaften.

Zur Vermittlung des komplizierten Klimawissens müssen daher Kommunikationsstrategien entwickelt werden, die der gesamten Komplexität und Mehrdimensionalität des Themas gerecht werden. Dies erfordert mühevolle Dialogprozesse, die weit über den klassischen Wissenstransfer – von sogenannten Fachleuten zu sogenannten Laien – hinausgehen.

Auch die Art der Information, die vermittelt werden soll, ist ein wichtiger Faktor. Nur wenige Interessengruppen benötigen Originaldaten, die etwa von hydrometeorologischen Service-Einrichtungen aus wissenschaftlichen Datenbanken gezogen werden. Die meisten Praktiker benötigen Analysen und fachliche Beurteilungen, die diese Daten mit dem spezifischen, lokalen Fachwissen zu neuen Erkenntnissen verknüpfen. Viele Fragen beziehen sich auf sehr konkrete Situationen, spezielle Regionen und besondere lokale Verhältnisse. Es ist von entscheidender Bedeutung, auch die sozialen, wirtschaftlichen und kulturellen Verhältnisse einer solchen Region zu kennen und sich mit dortigen Akteuren auf lokaler und nationaler Ebene zu vernetzen.

Ein derart anwendungsorientiertes Wissen zu Klima und Klimawandel stand der Gesellschaft – trotz der großen wissenschaftlichen Fortschritte – noch zu Beginn des vergangenen Jahrzehnts nicht zur Verfü-

gung. Daher entschied die Bundesregierung im Jahr 2007, ein deutsches Climate Service Center als Brücke zwischen der Klimaforschung und der Gesellschaft zu entwickeln. Dieses wurde schließlich 2009 zunächst als fünfjähriges Projekt und nun dauerhaft am Helmholtz-Zentrum Geesthacht eingerichtet. Es ergänzt das bestehende Angebot der Institutionen,

Das Vertrauen in kundenspezifische Klimadienste besteht nur bei Objektivität

die in Deutschland bereits lange erfolgreich Klimadienste anbieten. Dazu zählen der Deutsche Wetterdienst (DWD), die Regionalen Klimabüros der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) und das Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass) des Umweltbundesamtes.

Auch international entstehen viele Einrichtungen, die Klimaservice bieten. So entwickelt die Europäische Gemeinschaft am Europäischen Zentrum für Mittelfrist-Wettervorhersagen (ECMWF) zurzeit eine Servicestruktur für Klima- und Anpassungsdienste sowie eine umfassende Datenbank. Die Europäische Umweltagentur (EEA) in Kopenhagen baut eine Plattform auf, die Ländern und Gemeinden helfen soll, Anpassungsstrategien zu entwickeln.

Das EU-Forschungsrahmenprogramm Horizon 2020 fördert Projekte, die sich mit der Verbreitung von Klimainformationen beschäftigen. Die europäische Joint Programming Initiative (JPI) Climate mit 14 beteiligten Mitgliedstaaten will die Abstimmung und Koordinierung zwischen nationalen und europäischen Forschungsbemühungen im Bereich Klima verbessern. Die EU-Innovationsinitiative Climate-KIC bezieht bereits die europäische Unternehmenswelt mit in ihre Aktivitäten ein. Dies sind nur einige von vielen europäischen Initiativen.

Darüber hinaus haben die meisten Länder in Europa und anderswo in der Welt Klimadienst-Institutionen mit einem breiten Spektrum an Funktionen und Aufgaben etabliert. Zusätzlich wurden globale Netzwerkinitiativen entwickelt. Die UN-weite Initiative des Global Framework for Climate Services (GFCS), initiiert durch die World Meteorological Organization (WMO), hat zum Ziel, den globalen Austausch von Wissen zum Klimawandel zu stärken. >



Klimadienste sehen sich vielen Herausforderungen ausgesetzt. So müssen sie objektiv und neutral sein, sollten nicht interessengesteuert agieren und qualitativ hochstehende Basisdaten und Methoden verwenden. Nur so lässt sich das Vertrauen der Nutzer in die Produkte gewinnen. Branchen- und sektorspezifische Risiken und Chancen, die durch den Klimawandel entstehen, sind gemeinsam mit den relevanten Akteuren zu erschließen. Die Produkte sollten kundenspezifisch und – dem jeweiligen Bedarf entsprechend – individuell entwickelt werden.

Obwohl bereits viele Einrichtungen existieren, die Klimadienste – wenigstens teilweise – anbieten, gibt es dafür kein allgemeingültiges Konzept. Klare Auf-

ozeanischen und hydrologischen Daten, die sowohl Beobachtungen, Re-Analysen, Modellsimulationen und Projektionen enthalten; außerdem auch zusätzliche Daten etwa zu den Treibhausgas-Emissionen, zur Bevölkerungsdichte, zur Ausdehnung entwalder Regionen oder zum Städtewachstum.

Eine enge Kooperation zwischen Datenanbietern, Modellierern und den hydrometeorologischen Zentren tut not. Optimal ist die Zusammenarbeit dieser Gruppen in meteorologischen Zentren unter einem Dach, um die Verbindung zwischen Modellentwicklern und Klimaforschern in Universitäten und anderen wissenschaftlichen Institutionen zu stärken. Ferner sollte eine solche Einrichtung ein Team von Kommunikationsexperten beschäftigen, deren vorrangige Aufgabe der Aufbau von Verbindungen zu den potenziellen Kunden aus den verschiedenen ökonomischen Sektoren ist. Sie ermitteln ihren Bedarf, beantworten Fragen und übersetzen das Fachwissen anwendungsorientiert in eine leicht verständliche Form.

Klimadienste erstellen aber nicht nur anwendungsspezifisch aufbereitete Informationen und Dienstleistungen zum Klimawandel, sondern beraten auch hinsichtlich der Vorgehensweisen, um angemessen auf den Klimawandel reagieren zu können. Sie wirken also auch als „Anpassungsdienst“. Dieser Bottom-up-Ansatz involviert in erster Linie Sozial-, Wirtschafts- und Politikwissenschaftler sowie Ingenieure. Hier liegt der Fokus primär auf bewährten Vorgehensweisen, Lösungen und Richtlinien sowie auf lokalen Aspekten, weniger auf dem globalen Wandel.

Die Sprache dieser Wissenschaftsgemeinde unterscheidet sich von der herkömmlichen naturwissenschaftlichen Terminologie, was den Dialog zwischen ihr und den Naturwissenschaftlern erschwert. Hier spricht man nicht viel von Klimavorhersagen oder -projektionen, robusten Ergebnissen, Unsicherheiten und Szenarios, sondern von Vulnerabilität, Resilienz, Anpassung, Governance oder internationalen Verhandlungen.

Eine weitere zentrale Frage ist, ob es wirklich einen Markt für Klimaprodukte und -dienste gibt. Auch hier zeigt die Erfahrung, dass der Markt zu weiten Teilen noch entwickelt werden muss. Es besteht bei Unternehmen und öffentlichem Dienst durchaus ein Bedarf an Informationen zu Klimawandel und Anpassung, jedoch ist nicht sicher, dass dieser Bedarf immer erkannt wird.

Dem Schritt hin zu einer besseren Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und potenziellen Nutzern

Die Übersetzung von Forschungsergebnissen in praktisches Wissen ist schwierig

gabenteilung und funktionierende Kooperationen untereinander sind unerlässlich. Auch muss die Forschung zu Klimafolgen, Verwundbarkeit und Anpassung deutlich verstärkt werden. Klimadienste sollten neben der anwendungsorientierten Produktentwicklung auch den bestehenden Bedarf des Anwender in die Wissenschaft zurückspiegeln, damit deren Arbeit der Gesellschaft unmittelbar nützt.

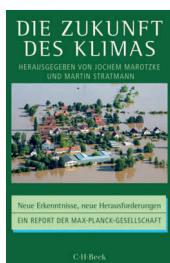
Gezielte Forschung ist notwendig, um den gesellschaftlichen Bedarf an Wissen zum Klimawandel besser zu verstehen und um Wege zu finden, fruchtbare Dialoge zwischen den Akteuren und der Wissenschaft zu fördern. Die Wissenschaftsgemeinde hat sich dafür bisher allerdings noch nicht ausreichend engagiert. Wissenschaftler, Anwender und Anbieter von Klimadiensten sollten deshalb ermutigt werden, gemeinschaftlich Produkte zu entwickeln. Auch müssen noch Erfahrungen dazu gesammelt werden, wie sich der Erfolg von Klimadiensten messen lässt.

Erste Erfahrungen zeigen, wie schwierig es ist, die Forschungsergebnisse in praktisches Wissen zu übersetzen, das unmittelbar in die Planungsprozesse der Entscheidungsträger einfließen kann. Bei der Entwicklung von Klimadiensten muss man die hierfür erforderlichen unterschiedlichen Aufgaben und Faktoren erkennen und miteinander verknüpfen. Unverzichtbar sind Datenbanken mit meteorologischen,

stehen jedoch einige Hindernisse entgegen. Zunächst einmal gibt es eine Diskrepanz zwischen den unterschiedlichen Zeithorizonten, mit denen Wissenschaftler und Entscheider in den verschiedenen gesellschaftlichen Bereichen arbeiten: Wissenschaftler nutzen in erster Linie sehr langfristige Klimaprojektionen, typischerweise für die nächsten 50 bis 100 Jahre. Unternehmer und Entscheider im öffentlichen Dienst hingegen benötigen Informationen für die nächsten fünf bis zehn Jahre. Weitere Fortschritte hinsichtlich der Erstellung von Klimavorhersagen auf saisonaler bis dekadischer Zeitskala sind daher von großer Bedeutung.

Zweitens passt das Geschäftsmodell der meisten Einrichtungen, die Klimadienste anbieten, nicht zu dem ihrer Kunden. Es basiert meist auf vertraglichen Beziehungen, und die Kunden werden – etwa von Forschungsinstitutionen – als Zuschussgeber betrachtet. Dies lässt sich aber oft nicht mit den Kundenanforderungen vereinbaren, da die Kunden eine sehr rasche Antwort auf ihre branchenspezifischen Fragen erwarten.

Hier könnten Beratungsunternehmen aus dem Privatsektor als weiteres Glied in der Informationskette zwischen Wissenschaft und Entscheidern nützlich sein, um die Ansprüche von Kunden zu erfüllen. Ihnen fehlen jedoch oft die spezielle Fachkompetenz und die enge Anbindung an die Wissenschaft, sodass ihr Angebot den wissenschaftlichen Qualitätsansprüchen nicht immer genügt. Eine Lösung könnte darin bestehen, dass öffentlich finanzierte Klimadienste prototypische Produkte entwickeln und dann private Beratungsunternehmen beauftragen, diese Produkte an die gesellschaftlichen Akteure zu vertreiben. Auf diese Weise würde jedoch die Rolle dieser öffentlich finanzierten Einrichtungen grundlegend verändert, da ihr Fokus damit in erster Linie auf der angewandten Forschung und Innovation läge und nicht mehr auf der Kommunikation und der Informationsverbreitung. ▶



Der Beitrag ist – in bearbeiteter und gekürzter Fassung – folgendem Buch entnommen:
Jochen Marotzke und Martin Stratmann (Hrsg.), **Die Zukunft des Klimas**,
Neue Erkenntnisse, neue Herausforderungen, Ein Report der Max-Planck-Gesellschaft,
230 Seiten, Verlag C.H. Beck, München 2015, 16,95 Euro

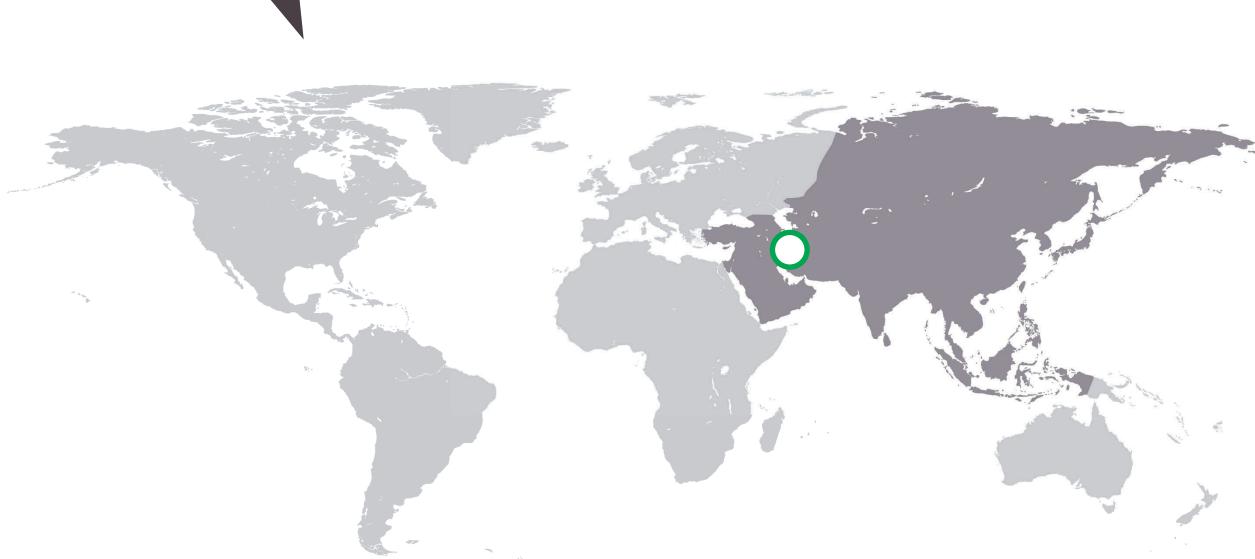
DIE AUTOREN



Guy Brasseur, geboren 1948 in Belgien, studierte Ingenieurwissenschaften an der Universität Brüssel, wo er 1976 seine Promotion abschloss. Er ist heute leitender Wissenschaftler und Projektleiter am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, in dem er früher auch als Direktor wirkte. Ferner war er Associate Director im National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado (USA). Sein wissenschaftliches Interesse liegt insbesondere im Bereich atmosphärische Chemie, Aeronomie der oberen Atmosphäre, solarerrestrische Beziehungen sowie Klimawissenschaften und Klimaservices. Von 2009 bis 2014 hat er in Hamburg das Climate Service Center des Helmholtz-Zentrums Geesthacht aufgebaut. Zurzeit ist er Vorsitzender des wissenschaftlichen Ausschusses des World Climate Research Programme.



Irene Fischer-Brunns, Jahrgang 1956, studierte Meteorologie an der Universität Hamburg, wo sie 1986 promovierte. Dort und am Max-Planck-Institut für Meteorologie arbeitete sie als Klimaforscherin in verschiedenen wissenschaftlichen Projekten. Hier galt ihr Interesse in erster Linie der klimatischen Wirkung von Aerosolen, der atmosphärischen Dynamik – vor allem im nordatlantischen Raum – und der Statistik. Seit 2009 arbeitete sie als wissenschaftliche Referentin von Guy Brasseur fünf Jahre mit am Aufbau des Climate Service Center des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, dem jetzigen Climate Service Center 2.0, wo sie auch heute noch tätig ist.



Das Leben berechenbarer machen

An den Max-Planck-Instituten arbeiten Wissenschaftler aus 120 Ländern dieser Erde. Hier schreiben sie über persönliche Erlebnisse und Eindrücke. Der Iraner Adrin Jalali forscht für seine Promotion am Max-Planck-Institut für Informatik im Feld der Computational Biology. Er erzählt, welche Erfahrungen er als ehemaliger Einwohner einer Millionenstadt mit dem deutschen Kleinstadtleben macht und warum er nie wieder nach Teheran zurückkehren möchte.

Als ich mir das Max-Planck-Institut für Informatik für meine Doktorarbeit aussuchte, hatte ich keine Ahnung, wo genau es seinen Sitz hat. Im Vergleich zu Teheran mit beinahe 16 Millionen Einwohnern ist Saarbrücken wirklich sehr überschaubar. Aber das hat auch Vorteile: So sieht man dort immer wieder die gleichen Gesichter, auf der Straße, in Läden, beim Weggehen... Das hat mir sehr dabei geholfen, mich einzuleben. Dazu kommt, dass die Saarbrücker sehr weltoffen sind. Weil die Stadt nur sieben Kilometer von Frankreich entfernt liegt, ist Saarbrücken recht international, und für die Bewohner ist es alltäglich, Menschen aus anderen Kulturen zu begegnen.

Ich besuche oft französische Städte in der Nähe; sogar nach Paris braucht man mit dem Zug gerade mal zwei Stunden. Wenn ich dort bin, wird mir bewusst, wie sehr ich mich an vieles typisch Deutsche gewöhnt habe. Ich schätze zum Beispiel die deutsche Verlässlichkeit und Pünktlichkeit sehr. Und ich komme sehr gut damit klar, dass die Deutschen so rational und direkt sind. Anders als in Kanada – wo ich zuletzt gelebt habe – und im Iran sagen einem hier die meisten Leute recht klar, was sie denken. Ich finde das gut, da weiß ich immer, woran ich bin.

Die Situation hier ist jedoch keineswegs perfekt. Deutschland hat zwar eines der besten Sozialsysteme, das war auch einer der Gründe, warum ich mich für Deutschland entschieden habe. Aber als Ausländer sollte man aufpassen, nicht benachteiligt zu werden. Weil ich nicht genug über das System wusste, habe ich ein jährliches Stipendium bekommen.



Adrin Jalali, 30, ist Doktorand am Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken. Nach politischen Repressalien in seiner Heimat Iran wanderte er 2011 nach Kanada aus, um an der University of British Columbia zu promovieren. Doch in Vancouver fühlte er sich nicht wohl, sodass er 2012 nach Deutschland wechselte. In der Abteilung von Thomas Lengauer entwickelt er lernende Programme, die biologische Daten etwa von Microarrays oder aus Analysen der DNA-Methylierung automatisch klassifizieren können. In seiner Freizeit macht er gern Ausflüge in die Umgebung.

Das deckt meine Lebenshaltungskosten, aber leider kann ich nicht in die Sozialversicherung einzahlen. Das ist mir ein echtes Anliegen – nicht nur wegen meiner persönlichen Absicherung, sondern auch um Teil eines Solidarsystems zu sein, das ich politisch befürworte. Außerdem trifft man als Neuankömmling in Deutschland immer wieder auf Vorurteile. So kann es passieren, dass einem die Leute fehlende sprachliche und kulturelle Kenntnisse als mangelnde wissenschaftliche Kompetenz auslegen.

Allerdings erlebe ich so etwas bei uns am Max-Planck-Institut kaum. In unserer Gruppe kommen wir aus den verschiedensten Ländern, und trotzdem arbeiten wir perfekt zusammen. Die wissenschaftliche Arbeit ist wirklich toll hier! Es ist eine faszinierende Herausforderung, Computerprogramme mitzuentwickeln, die eine bessere Krebsbehandlung ermöglichen.

Manchmal werde ich gefragt, ob ich nicht den Iran oder das Leben dort vermisste. Aber außer meinen Freunden und meiner Familie fehlt mir wirklich nichts. Im Gegenteil: Nach dem, was ich durchgemacht habe, kann ich mir nicht vorstellen zurückzukehren. Ich musste aus politischen Gründen 105 Tage im Gefängnis verbringen – anfangs zu elft auf so engem Raum, dass wir uns nicht einmal zum Schlafen hinlegen konnten. Anders als viele, die zu teils lebenslangen Gefängnisstrafen verurteilt wurden, oder als mein Freund, Jafar Kazemi, der erhängt wurde, hatte ich Glück und wurde am Ende freigesprochen. Aber ein zweites Mal würde ich nicht riskieren, verhaftet zu werden. Das Leben in so einem System ist vollkommen unberechenbar, und ich weiß, dass die Behörden nach wie vor misstrauisch sind. Zumindest kann ich meine Familie gelegentlich in der Türkei treffen – dorthin dürfen wir alle ohne Visum reisen.

Ich möchte gern auf Dauer in Deutschland leben – entweder in Saarbrücken oder in einer anderen Stadt. Und am liebsten würde ich weiter in der Wissenschaft arbeiten, denn es ist mir wichtig, dass meine Forschung allen frei zugänglich ist und nicht als Betriebsgeheimnis hinter verschlossenen Türen bleibt. Seit ich hier bin, lerne ich Deutsch. Das ist mühsam, aber ganz langsam merke ich, dass ich Fortschritte mache. Leider reichen meine Kenntnisse noch nicht für die deutsche Literatur. Bücher von Marx und Hegel im Original zu lesen – das ist mein Ziel.

Schutzschilder im Sonnensystem

Schnee aus Eisen und metallischer Wasserstoff – beides kann Magnetfelder antreiben. Deren Vermessung eröffnet Einblicke in die Prozesse, die das Innenleben der Planeten verändern. Die Vielfalt dieser Magnetfelder untersucht **Ulrich Christensen**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung** in Göttingen.

TEXT THORSTEN DAMBECK

In den 1950er-Jahren steckte die Radioastronomie noch in den Kinderschuhen. Doch die Observatorien waren keineswegs klein, im Gegen teil: Auf riesigen Freiflächen lauschten die Astronomen nach himmlischen Radioquellen. Mit einer solchen Anlage bei Seneca im US-Bundesstaat Maryland, auf der mehr als acht Kilometer Antennendraht verspannt waren, gelang US-Forschern 1955 ein Zufallsfund: Bei der Beobachtung des 6300 Lichtjahre entfernten Krebsnebels spürte das Antennenungetüm einen sehr viel näheren Sender auf, der immer wieder mal mit Kurzwellen dazwischenfunkte: Jupiter.

Der Planet stand auf seinem Weg durch den Tierkreis für die Störaktion gerade an der passenden Stelle. Bald schon fingen die Astronomen weitere Radiostrahlung von ihm auf, diesmal bei höheren Frequenzen und zeitlich weitgehend konstant. Ein stimmiges Bild ergab sich: Um all das zu bewerkstelligen, musste Jupiter in ein Magnetfeld gehüllt sein – denn die hochfrequenten Wellen stammten von Elektronen, die magne-

tisch gefangen um den Riesenplaneten sausen. Das erste planetare Magnetfeld jenseits der Erde war gefunden.

Heute treiben Messungen vor Ort die Erforschung von Jupiters magnetischem Feld voran. Seit 1973 trugen acht Raumsonden dazu bei, weitere Missionen sind unterwegs oder in Planung. Bei anderen Planeten wurden die robotischen Entdecker ebenfalls fündig: Denn auch Saturn, Uranus und Neptun haben globale Magnetfelder; hinzu kommt der kleinste Planet, Merkur. Doch sind die Eigenschaften der Felder recht unterschiedlich.

EINE SCHNELLE ROTATION HILFT DEM DYNAMOEFFEKT

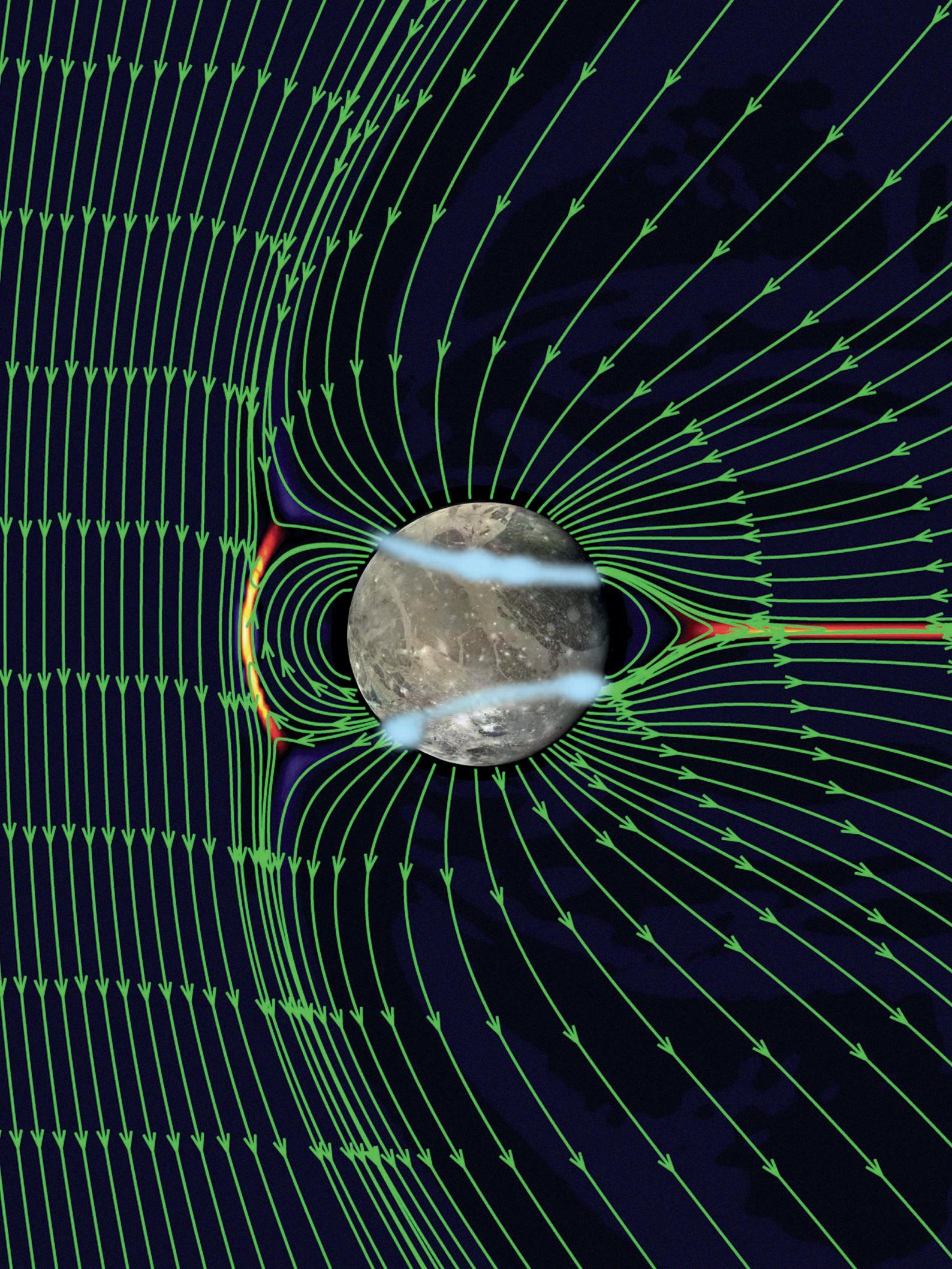
„Es gibt eine unübersichtliche Vielfalt“, sagt Ulrich Christensen. Am Fenster seines Büros im Göttinger Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung reihen sich die Globen von Himmelskörpern: Erdmond und Mars, beide sind den Raumsonden zufolge heute ohne globales Magnetfeld. Auch die Venus hat einen Fensterplatz. Lange wurde sie

„Schwester der Erde“ tituliert – doch anders als unsere Heimatwelt hat auch sie kein eigenes Magnetfeld.

Was macht den Unterschied zu den magnetischen Planeten aus? „Himmelskörpern ohne Magnetfeld fehlt ein aktiver planetarer Dynamo“, sagt Christensen, Experte für die numerische Simulation solcher Dynamos. Alle globalen Magnetfelder entstünden tief unter den Oberflächen der Planeten. „Dort müssen elektrisch leitende Flüssigkeiten durch Strömungen in Bewegung kommen. Sehr hilfreich für einen Dynamoprozess ist auch eine genügend schnelle Eigenrotation.“ Daran hapert es etwa bei der Venus, die nicht weniger als 243 Erdentage für eine Umdrehung um ihre eigene Achse benötigt.

Jupiter vollführt eine Rotation in weniger als zehn Stunden, sein Magnetfeld ähnelt in mancher Hinsicht dem der Erde. Zwar ist es mehr als zehnmal stärker. Doch ebenso wie bei uns messen die Forscher im Wesentlichen ein einfaches Dipolfeld, vergleichbar also einem gigantischen Stabmagneten. Auch ist das Feld rund zehn Grad gegen

Sonderstatus: Als einziger Trabant verfügt Ganymed über eine eigene kleine Magnetosphäre. Sie liegt inmitten der Feldlinien des Jupiters, die sich nahe dem Mond deformieren und teilweise mit jenen des Ganymed vermischen. Dort, wo sich die Feldlinien öffnen, dringen Teilchen aus Jupiters Magnetosphäre in die dünne Atmosphäre und erzeugen Polarlichter, auch Aurorae genannt.



die planetare Rotationsachse geneigt. Das bedeutet aber nicht, dass im Innern Jupiters dieselben Prozesse ablaufen wie im Erdinnern, denn als Gasriesen ist er völlig anders aufgebaut.

Die Rolle des flüssigen Eisens, dessen Strömungen im Erdkern unser Magnetfeld bewirken, spielt im Jupiter der Wasserstoff – also die Substanz, aus welcher der Planet überwiegend besteht. Doch ist es ein anderer Wasserstoff als der, den wir kennen. Denn durch den hohen Druck, dem das Element im Innern des Planeten ausgesetzt ist, ändert es radikal seine Eigenschaften.

Nicht nur, dass die Atome so eng zusammengequetscht werden, dass sie eine Flüssigkeit bilden. Vor allem sind ihre Elektronen nicht mehr auf ihre vormaligen Heimatatome beschränkt,

sondern können nahezu frei umherwandern: Aus dem Isolator wird also ein Metall. Darauf deuten neben theoretischen Rechnungen auch Laborexperimente hin – etwa am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz. Dort setzen die Forscher Wasserstoff mächtig unter Druck, bis auf Werte, wie sie ähnlich im Innern von Gasplaneten auftreten. Bei mehreren Millionen Bar registrierten sie dabei im Jahr 2011 eine Zunahme in der elektrischen Leitfähigkeit.

DER JUPITERMOND GANYMED IST GRÖSSER ALS MERKUR

Dem größten Planeten widmet sich auch Johannes Wicht. Dabei ist der Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung auf eine

doppelte Struktur gestoßen, die er vor Kurzem mit seinem Kollegen Thomas Gastine in den *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* geschildert hat: „Unsere Simulationen zeigen, dass die erdähnliche Komponente des Magnetfelds in den Tiefen der Atmosphäre erzeugt wird“, erläutert Wicht.

Hinzu kommt ein zweiter Dynamo-prozess, der am Übergang zum metallischen Wasserstoff stattfindet. Das Magnetfeld des Gasriesen mag zwar erdähnlich erscheinen, sein Ursprung geht jedoch auf exotische Prozesse zurück.

67 bekannte Satelliten umkreisen Jupiter – eine Art Sonnensystem en miniature. Mit Ganymed beherbergt es den größten aller Monde; sein Durchmesser beträgt 5268 Kilometer, damit übertrifft er den des Planeten Merkur. Zwischen

DER MAGNETISCHE SONNENNACHBAR

Äußerlich ähnelt er dem Mond, doch unter seiner Oberfläche unterscheidet sich der sonnennächste Planet Merkur von allen anderen Körpern im inneren Sonnensystem. Eigentlich ist vor allem sein riesiger Metallkern, der 83 Prozent des Planetenradius einnimmt (Vergleichswert Erde: 54 Prozent). Auch sein Magnetfeld ist sonderbar. Schon länger war bekannt, dass es nur ein Prozent der Stärke des Erdfelds besitzt.

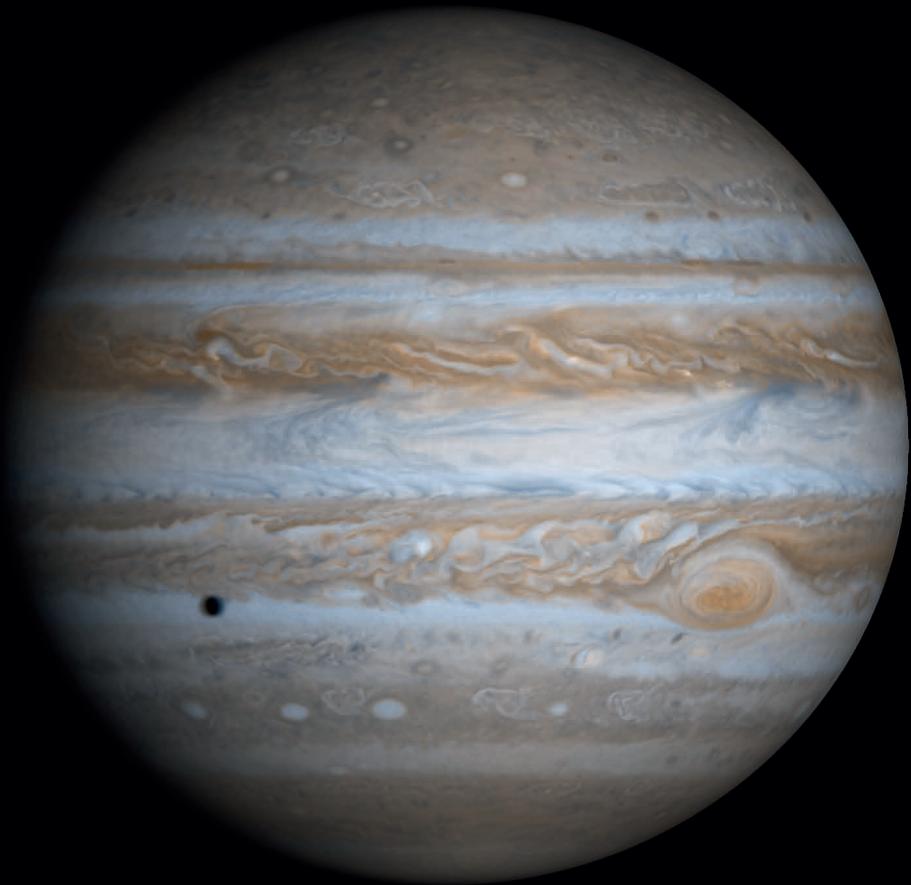


Merkurs Magnetfeld im Modell: Die Darstellung beruht auf Daten des ersten Vorbeiflugs der Raumsonde *Messenger*. Registriert und abgebildet ist der Bereich geladener Teilchen, der durch Wechselwirkungen mit dem Sonnenwind entsteht.

„Kürzlich hat die NASA-Sonde *Messenger* eine signifikante Nordverschiebung des magnetischen Äquators im Vergleich zum geografischen Äquator gemessen – es geht dabei um immerhin 20 Prozent des Planetenradius“, erläutert Johannes Wicht aus der Abteilung für Planeten und Kometen am Göttinger Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung. „Diese Nord-Süd-Asymmetrie ist ebenso erstaunlich wie einzigartig, denn das Magnetfeld des Merkurs ist ansonsten sehr einfach strukturiert und beinahe rotationssymmetrisch.“ Es wirke, als hätte man einen Stabmagneten einfach in Richtung Norden verschoben.

In einer aktuellen Studie haben Wicht und sein Team mehrere Dynamomodelle analysiert, um den magnetischen Besonderheiten des Merkurs auf die Schliche zu kommen. „Ganz ähnlich wie im Ganymed könnte auch im Merkur Eisenschnee eine wichtige Rolle für den Dynamo spielen“, erklärt der Wissenschaftler.

Der Schnee treibt den Dynamo so stark an, dass das erzeugte Magnetfeld kleinskalig ist und die Nord-Süd-Symmetrie hinreichend gebrochen wird. Gleichzeitig hinterlässt der Eisenschnee unter dem Gesteinsmantel eine dicke Schicht aus schweifelreichem Material, die nicht am Dynamoprozess teilnimmt. Sie wirkt wie ein Filter, der ausschließlich die einfachen Bestandteile des Magnetfelds bis an die Oberfläche durchdringen lässt.

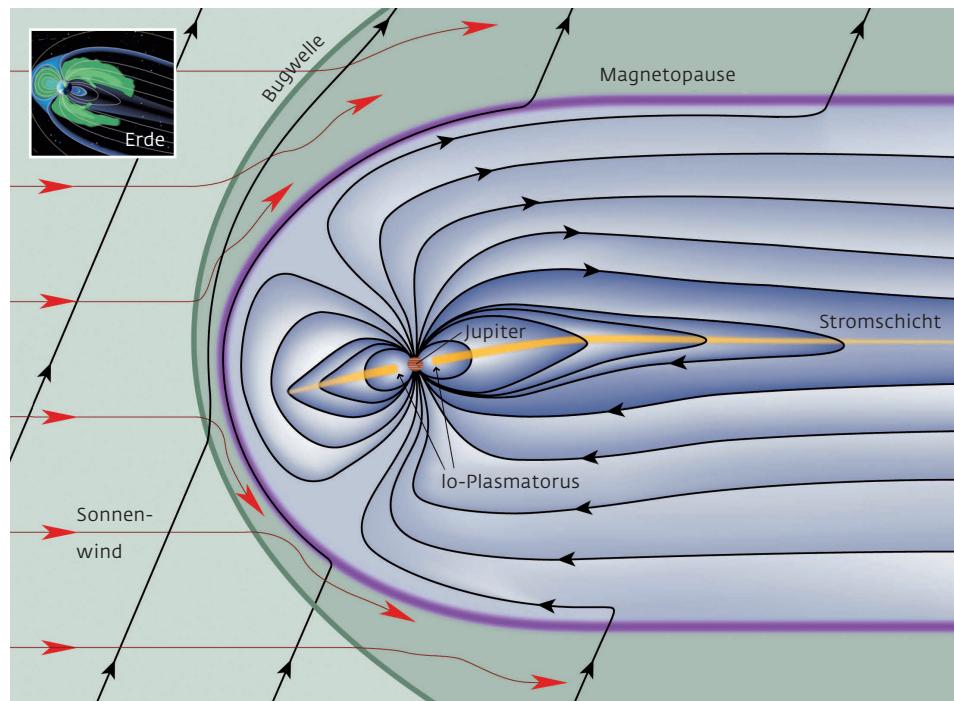


1995 und 2003 erforschte die amerikanische Raumsonde *Galileo* das Jupiter-System, mehrmals stand auch der Riesenmond auf dem Besuchsprogramm.

Dabei entdeckte *Galileos* Magnetometer ein Unikum, das den Mond bis heute auszeichnet: Ganymed ist der einzige Trabant, der ein globales Magnetfeld besitzt, es ist immerhin dreimal stärker als das des Merkurs („Der magnetische Sonnennachbar“, linke Seite). Eine jüngst von Ulrich Christensen im Fachjournal *ICARUS* publizierte Studie gewährt Einblicke in Ganymeds Innengeben. „Wie auf der Erde ist ein flüssiger Eisenkern die Quelle des Magnetfelds“, sagt der Max-Planck-Direktor. Gleichzeitig weist er ältere Ideen zurück, das salzige Tiefenmeer, das Ganymed wahrscheinlich ebenso wie sein Nachbarmond Europa besitzt, könnte der Ort des Dynamogeschehens sein.

„Wahrscheinlich ist in Ganymeds Kern auch einiges an Schwefel vorhanden“, sagt Christensen. Dies ist nicht ungewöhnlich, auch im Erdkern werden zusätzlich zur metallischen Komponente bis zu zehn Prozent leichtere Substanzen angenommen, vermutlich ein Gemisch aus Schwefel, Sauerstoff und Silicium. Gleichwohl muten die

Gestreiften Gasriesen: Mit einem Äquatordurchmesser von 142984 Kilometern ist Jupiter der größte Planet im Sonnensystem. Das Bild oben zeigt ihn in natürlichen Farben mit dem Schatten seines Mondes Europa (links). Die Abbildung unten verdeutlicht Formen und Größen der Magnetfelder von Erde (links oben) und Jupiter. Die Gestalt des irdischen Magnetfelds wird im Wesentlichen bestimmt durch den Sonnenwind, jene des Jupiters durch die vulkanische Aktivität des Mondes Io. Dessen Teilchen speisen stetig die Magnetosphäre und formen die Magnetfeldlinien zu einer sogenannten Stromschicht.





Befasst sich mit Magnetfeldern im Planetensystem: Ulrich Christensen, Direktor am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen.

sich auf neue Daten freut, wie sie der *Jupiter Icy Moon Explorer (Juice)* liefern soll. Diese schweregewichtige Mission will die Europäische Weltraumagentur 2022 auf die Reise schicken, die Ankunft ist für 2030 geplant.

Die ESA-Sonde soll schließlich in eine Umlaufbahn um Ganymed einschwenken und unter anderem dessen Magnetfeld gründlich vermessen. Ein weiteres Novum: Die Planetenforscher werden die Wechselwirkung der ungleichen magnetischen Dynamos von Ganymed und Jupiter in den Fokus nehmen.

Jupiters Magnetfeld dominiert eine enorme Region rings um den Gasriesen: seine Magnetosphäre. Neben jener der Sonne ist sie die größte Struktur im Planetensystem. „Sogar am Saturn ist sie noch spürbar“, sagt Norbert Krupp, der die magnetosphärischen Prozesse beider Gasplaneten studiert hat. Als Teammitglied der *Cassini*-Mission spielt der Göttinger Max-Planck-Wissenschaftler seit einem Jahrzehnt bei der Erforschung des Saturnsystems in der ersten Reihe mit.

„Saturns Magnetosphäre ähnelt einem riesigen Stromlinienkörper, in dessen Kopf der Ringplanet sitzt“, sagt Krupp. An der Stirnseite treffen die geladenen Teilchen des Sonnenwindes auf diesen magnetischen Schutzschild. Abrupt werden sie dort abgebremst und in einem weiten Bogen um den Planeten gelenkt. Je nach Stärke der Sonnenaktivität passiert dies 20 bis 35 Saturnradien vom Planeten entfernt.

Auf der entgegengesetzten Seite formt die Magnetosphäre einen langen „Schweif“ aus, den „Magnetotail“. Vermutlich reicht er Hunderte Saturnradien ins Weltall. Die Gestalt von Saturns Magnetfeld ähnelt somit jener der Magnetfelder von Erde und Jupiter, ihre Größe rangiert dazwischen. >

Prozesse im Ganymedkern, die Christensen simuliert hat, bizarr an: Es geht um eine Art Schnee, dessen „Flocken“ allerdings nicht aus Eis, sondern aus Eisen bestehen.

Vor dem gedanklichen Ausflug in diese exotische Welt ruft der Forscher das Zentrum unseres Planeten in Erinnerung: Dort existiert bekanntlich ein fester Eisen-Nickel-Kern. Dieser wuchs im Laufe der Erdgeschichte durch langsames Abkühlen heran – und zwar wegen des hohen Drucks zuerst im Zentrum; im Jargon spricht man von „Ausfrieren“. Darüber befindet sich eine geschmolzene Zone, die den festen Innenkern komplett umhüllt. Das ist das flüssige Stockwerk des irdischen Metallkerns, der Ort der Konvektionsströmungen.

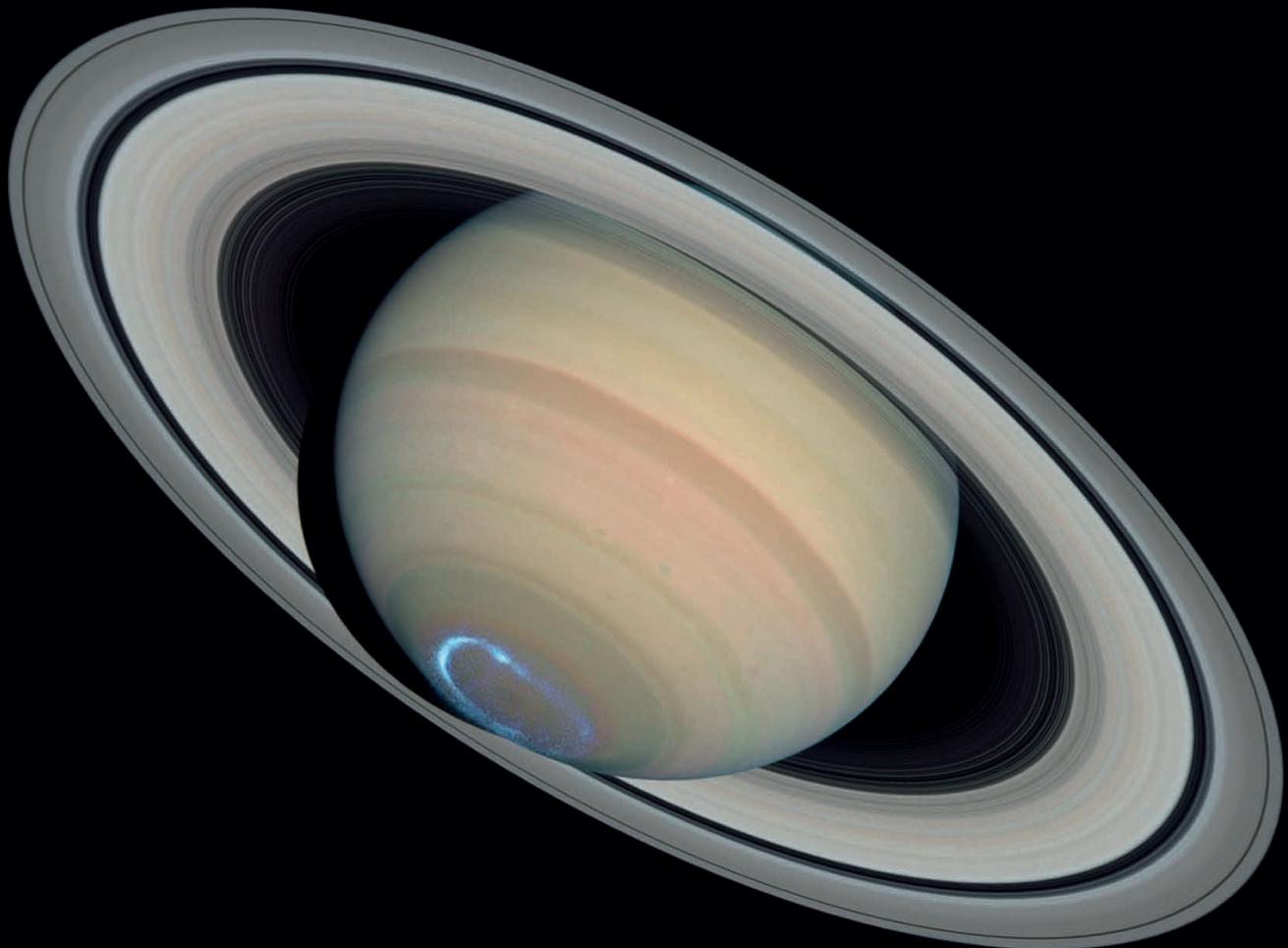
„Konvektionsströmungen können nicht nur durch Temperaturdifferenzen in Gang kommen, sondern auch durch unterschiedliche chemische Konzentrationen“, sagt Ulrich Christensen. Bei Ganymed gehe es zwar auch um das Ausfrieren des Eisens, doch den Simulationsrechnungen zufolge ist sein Eisenkern anders aufgebaut: „Der Druck dort ist viel kleiner als im Erdkern. Es ist deshalb wahrscheinlich, dass der Kern dieses Mondes zuerst außen gefriert und die dichteren Eisenflocken wie Schnee

abwärtsrieseln, nämlich in Richtung Zentrum. Dort steigen die Temperaturen jedoch an, und der Eisenschnee schmilzt wieder.“

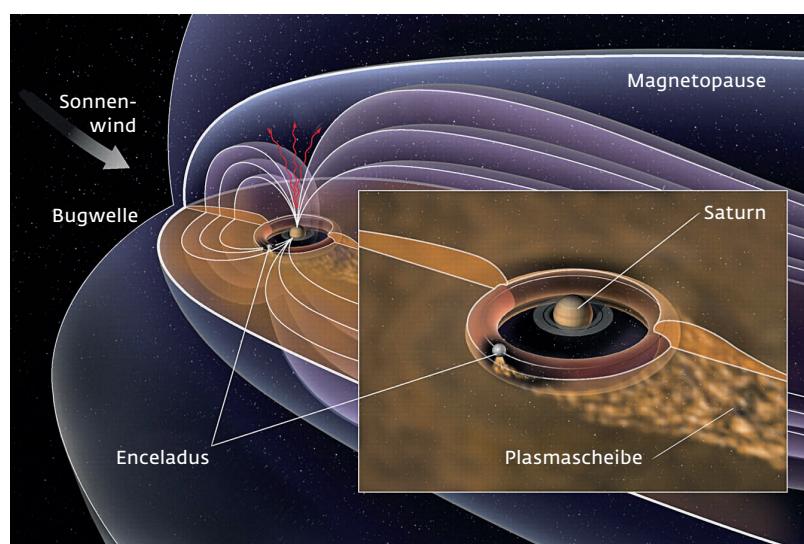
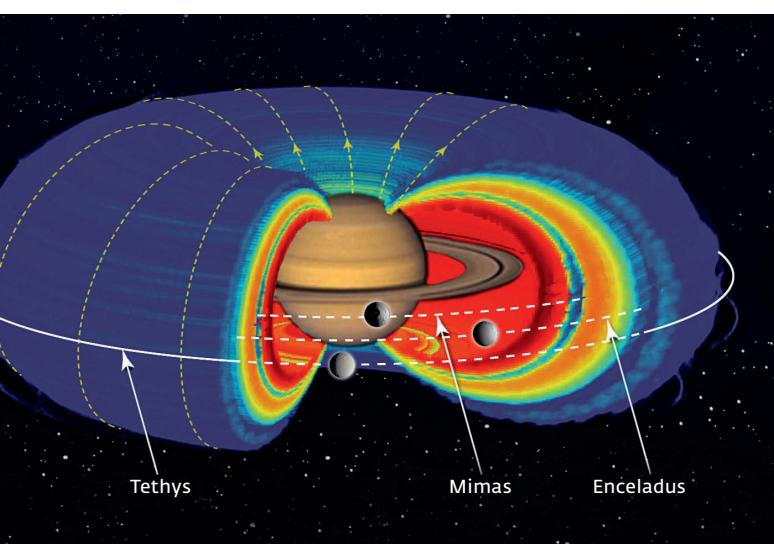
MODELLRECHNUNGEN KOMMEN DER REALITÄT RECHT NAHE

In der metallischen Legierung findet also ein abwärtsgerichteter Nettotransport von Eisen statt. Im Gegenzug bildet sich oben eine stabile flüssige Schicht, die weniger Eisen, dafür aber mehr Schwefel enthält. Als Konsequenz dieser Konzentrationsunterschiede springt die Konvektionsströmung an, die wiederum den Ganymeddynamo antreibt. Diese chemische Konvektion ist laut Christensen in kleineren planetaren Körpern wichtiger als die thermische Konvektion. „Im Ganymedkern dürfte sie zumindest dominieren, womöglich ist sie sogar die einzige Form.“

Die Modellrechnungen des Forschers reproduzieren das von Galileo gemessene globale Magnetfeld recht gut – insbesondere den nur kleinen Beitrag, den höhere Feldanteile zum Gesamtfeld leisten. Allerdings konnte die Sonde während ihrer kurzen Vorbeiflüge lediglich wenige Messungen beisteuern, räumt Christensen ein, der



Beringte Kugel: Schon im kleinen Teleskop besticht der Planet Saturn durch sein ausgedehntes Ringsystem. Das Weltraumteleskop *Hubble* enthüllt feine Details, etwa eine hellblaue Struktur um einen der Pole (Bild oben). Dabei handelt es sich um eine Aurora, die im UV-Licht leuchtet und mit dem Magnetfeld des Planeten in Verbindung steht. Dieses Magnetfeld (Grafik unten rechts) ähnelt – wie das von Erde und Jupiter – einem riesigen Stromlinienkörper, in dessen Kopf der Ringplanet sitzt. Der Raumbereich des Felds wird mit Partikeln geimpft, die der Mond Enceladus ständig freisetzt. Der Trabant kreist zusammen mit anderen wie Tethys und Mimas in einem Plasmatorus aus positiv geladenen Partikeln um Saturn (Grafik unten links).





Besprechung in kleiner Runde: Thomas Gastine, Johannes Wicht und Markus Fränz (von links).

Der offenkundigste Beleg für das magnetische Geschehen auf dem Ringplaneten sind Leuchterscheinungen in dessen Nord- und Südpolgebieten: die Aurorae. Wie auf der Erde entstehen sie, wenn Partikel des Sonnenwinds, die im Saturnmagnetfeld eingefangen wurden, entlang der magnetischen Feldlinien hinab zu den Magnetpolen spiralisieren und dabei gegen die Moleküle der Atmosphäre stoßen. Anders als unsere Polarlichter erstrahlt die Saturnaurora allerdings nicht im sichtbaren Licht, sondern bei ultravioletten Wellenlängen. Und während auf der Erde starke Polarlichtaktivitäten typischerweise nach einigen Stunden vorbei sind, lassen sie sich auf dem Saturn mitunter tagelang beobachten.

MEHRERE RUNDEN IM MAGNETFELD BRINGEN ENERGIE

Die Magnetosphäre Saturs ist Schauspielplatz energiereicher Prozesse, denn sie ist angefüllt mit rasanten Partikeln. Diese stammen hauptsächlich von Enceladus: Pro Sekunde stößt der geologisch aktive Minimond 100 bis 300 Kilogramm Wasserdampf und Eispartikel aus, ein Teil davon kann sein schwaches Schwerefeld verlassen. „Die H₂O-Moleküle werden

durch die solare UV-Strahlung ionisiert und im Magnetfeld beschleunigt, man kann ihnen außerhalb der Enceladusbahn in der gesamten Magnetosphäre begegnen“, sagt Norbert Krupp.

In mehreren Strahlungsgürteln konzentrieren sich hauptsächlich Protonen und Elektronen, die Energien bis zu 100 Megaelektronenvolt (MeV) erreichen können. „Wie sie das genau schaffen, das ist noch Gegenstand intensiver Forschung. Womöglich haben sie bereits mehrere Runden im Magnetfeld hinter sich, wenn sie derart energiegeladen auf die Detektoren treffen“, erklärt Krupp. Durch die absorbierende Wirkung der Ringe und der inneren Monde sind diese Gürtel jedoch weniger intensiv ausgeprägt als ihr irdisches Pendant, der Van-Allen-Gürtel.

Die Saturnmonde sind den prasselnden Partikeln ausgesetzt. Zusammen mit seinem Kollegen Elias Roussos erforscht Norbert Krupp deshalb auch den Einfluss, den der Dauerbeschuss energiereicher Teilchen – insbesondere Elektronen – auf die Oberflächen der Monde ausübt. Experten sprechen von „Space Weathering“, wenn sie die chemische Verwitterung der Oberfläche eines Himmelskörpers durch die Einflüsse des freien Weltalls beschreiben.

Aktuelle Analysen, die jüngst in der Zeitschrift ICARUS erschienen, deuten darauf hin, dass die dem Saturn zugewandten Seiten der Eismonde Mimas, Tethys und Dione durch Beschuss mit Elektronen chemisch verändert werden. Diese sind so energiereich (einige MeV), dass sie senkrecht zum Magnetfeld, aber in entgegengesetzter Richtung zur Bahnbewegung der Monde driften. Gleichzeitig laufen sie zwischen Nord- und Südpol entlang des Magnetfelds hin und her. Mit diesem Bewegungsmuster können Experten die Auftreffzonen auf dem jeweiligen Mond berechnen. Es zeigte sich, dass einige der von Cassinis Bordkameras beobachteten Oberflächenmerkmale in den Äquatorregionen zum berechneten Verteilungsmuster der Partikel passen.

Zurück ins innere Sonnensystem: Was mit einem terrestrischen Planeten passiert, wenn sein magnetischer Schutzschild erlischt, lässt sich am Roten Planeten studieren. Denn einst dürfte auch der Mars einen aktiven Dynamo gehabt haben: Ein Flickenteppich von magnetisiertem Gestein auf seiner Oberfläche verweist noch heute auf diese magnetische Ära. Markus Fränz, ebenfalls vom Göttinger Max-Planck-Institut, hat die Plasmamessungen der Son-

Gezeichnet vom Weltraumwetter: Die Oberfläche des Saturnmondes Tethys trägt deutliche Spuren chemischer Verwitterung. So etwa röhrt der bläuliche Streifen in der rechten Bildhälfte von energiereichen Elektronen her, die unter dem Einfluss des planetaren Magnetfelds den Boden bombardieren.

de *Mars Express* ausgewertet, die seit 2003 im Marsorbit kreist.

Kann man heute noch messen, wie das Wasser des ungeschützten Planeten der solaren UV-Strahlung und dem Sonnenwind zum Opfer fällt? „Wir messen sozusagen die Spaltprodukte des H₂O-Moleküls, nämlich die Sauerstoffionen. Neuerdings beziehen wir auch die Messungen des Radarinstrument in unsere Analysen ein“, sagt Fränz. Damit bekommen die Forscher ein vollständigeres Bild, denn sie sehen auch das energieärmere, kalte Plasma, das dem eigentlichen Plasmainstrument verborgen bleibt.

Mit dem so erhobenen Ionenabfluss kann man die anfängliche Wassermenge zurückrechnen, und es ergibt sich eine dramatische Austrocknung: Die Wassermenge eines globalen Marsozeans mit mehreren Hundert Metern Mächtigkeit ist demnach im Laufe der Jahrtausenden ins All entwichen. „Der tatsächliche Wert dürfte sogar höher liegen, da die Sonne in ihrer Jugend wahrscheinlich erheblich aktivere Phasen als heute durchmachte und die Wasservorräte damals besonders drastisch dezimierte“, vermutet Markus Fränz.

Was vor sechs Jahrzehnten mit den Radiowellen des Jupiters begann, hat mittlerweile viele Erkenntnisse über die Planeten gebracht. Und ein weiteres Rendezvous mit dem Gasriesen ist schon fest eingeplant: An Bord der oben erwähnten *Juice*-Sonde wird auch ein Magnetometer (JMAG) ins Jupitersystem reisen, auf dessen Daten sich besonders Christensen, Krupp und Roussos freuen.

Auch ein Teilcheninstrument namens *Particle Environment Package* (PEP) wird mit an Bord sein, wichtige Beiträge



ge dazu werden aus Deutschland kommen. Fränz und seine Kollegen wollen damit die dünnen Gashüllen der Jupitermonde sowie die Neutralteilchen

und Ionen vermessen, die sich in den dortigen Magnetfeldern tummeln. Markus Fränz ist sicher: „Die Entdeckungen gehen weiter.“ ▲

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Obwohl Magnetfelder im Kosmos weit verbreitet sind, besitzen nicht alle Planeten unseres Sonnensystems eines. Bei Venus und Mars fehlen sie.
- Auch wenn sie in großer Vielfalt auftreten und sehr unterschiedlich strukturiert sind: Alle globalen Magnetfelder entstehen tief unter den Oberflächen der Planeten und bedürfen eines aktiven Dynamos.
- Der Jupitermond Ganymed gilt als der einzige Trabant, der ein globales Magnetfeld besitzt; es ist dreimal stärker als jenes des Planeten Merkur.
- Besonders ausgedehnt sind die Magnetfelder der Gasplaneten Jupiter und Saturn. Jupiters Magnetosphäre ist neben jener der Sonne die größte Struktur im Planetensystem.

GLOSSAR

Aurora: Dieses auch Polarlicht genannte Phänomen ist eine Leuchterscheinung in den Polbereichen eines Planeten. Ursache sind Teilchen des Sonnenwinds – vor allem Elektronen und Protonen –, die auf schwere Ionen in den oberen Schichten einer Gasatmosphäre treffen und dort letztlich Fluoreszenz hervorrufen.

Space Weathering: Fachbegriff für die chemische Verwitterung der Oberfläche eines atmosphärenlosen Himmelskörpers. Ursachen für eine solche Erosion sind Einflüsse aus dem freien Weltall wie der Einschlag von Mikrometeoriten, kosmische Strahlung oder solare UV-Strahlen.

Van-Allen-Gürtel: Ein nach dem US-amerikanischen Astrophysiker James Van Allen (1914 bis 2006) benannter Ring (Torus) aus energiereichen, geladenen Teilchen, die durch das Magnetfeld der Erde eingefangen werden. Der Gürtel besteht im Wesentlichen aus zwei Strahlungszonen. Auch andere Planeten besitzen ähnliche Strukturen.

Sterne mit großer Anziehung

Sie gehören zu den exotischsten Objekten im All: Neutronensterne. Unvorstellbar dicht und nur 20 Kilometer groß, rotieren sie rasend schnell um ihre Achsen, wobei sie Strahlungskegel in den Raum senden. Manche dieser kosmischen Leuchttürme haben besonders starke Magnetfelder.

Michael Gabler vom **Max-Planck-Institut für Astrophysik** in Garching studiert diese Magnetare – und lernt so einiges über deren Beschaffenheit.

TEXT HELMUT HORNUNG

Am fünften Tag der Reise kam ein gewaltiger Sturm auf, der das Boot immer weiter vom Kurs abtrieb – direkt auf den Magnetberg zu. Da halfen auch keine Gebete: „Die Kraft des Berges begann, das Schiff an sich zu ziehen, dass es in Stücke ging.“ Die Ritter im Volksbuch *Herzog Ernst* aus dem späten 12. Jahrhundert müssen mit einer der Gefahren kämpfen, die neben furchtbaren Schlangen und anderen Monstern auf die Seefahrer früherer Epochen in den Untiefen des Ozeans lauerten. Irdische Magnetberge gehören allerdings ins Reich der Fabel. Magnetische Sterne aber gibt es tatsächlich.

Magnetfelder sind im Universum allgegenwärtig. Sie existieren um Planeten, durchziehen unsere Milchstraße und stecken nicht nur im galaktischen Gas, sondern finden sich auch in den daraus geformten Sonnen. Die meisten Sterne besitzen allerdings nur sehr schwache globale Magnetfelder. In den 1950er-Jahren entdeckten die Astronomen aber sogenannte Ap-Sterne. In deren Hüllen fanden sich große Mengen an Metallen wie Mangan oder

Chrom. Diese Himmelskörper haben die zwei- bis zehnfache Masse unserer Sonne – und ein tausendfach stärkeres Magnetfeld. Der Stern Alioth in der Deichsel des Großen Wagens beispielsweise zählt zu dieser Familie. Auch unter den Weißen Zwergen, den ausgebrannten Kernen gewöhnlicher Sterne, fanden die Forscher manch magnetisches Exemplar.

EINE POTENZIELLE GEFAHR FÜR INTERSTELLARE RAUMSCHIFFE

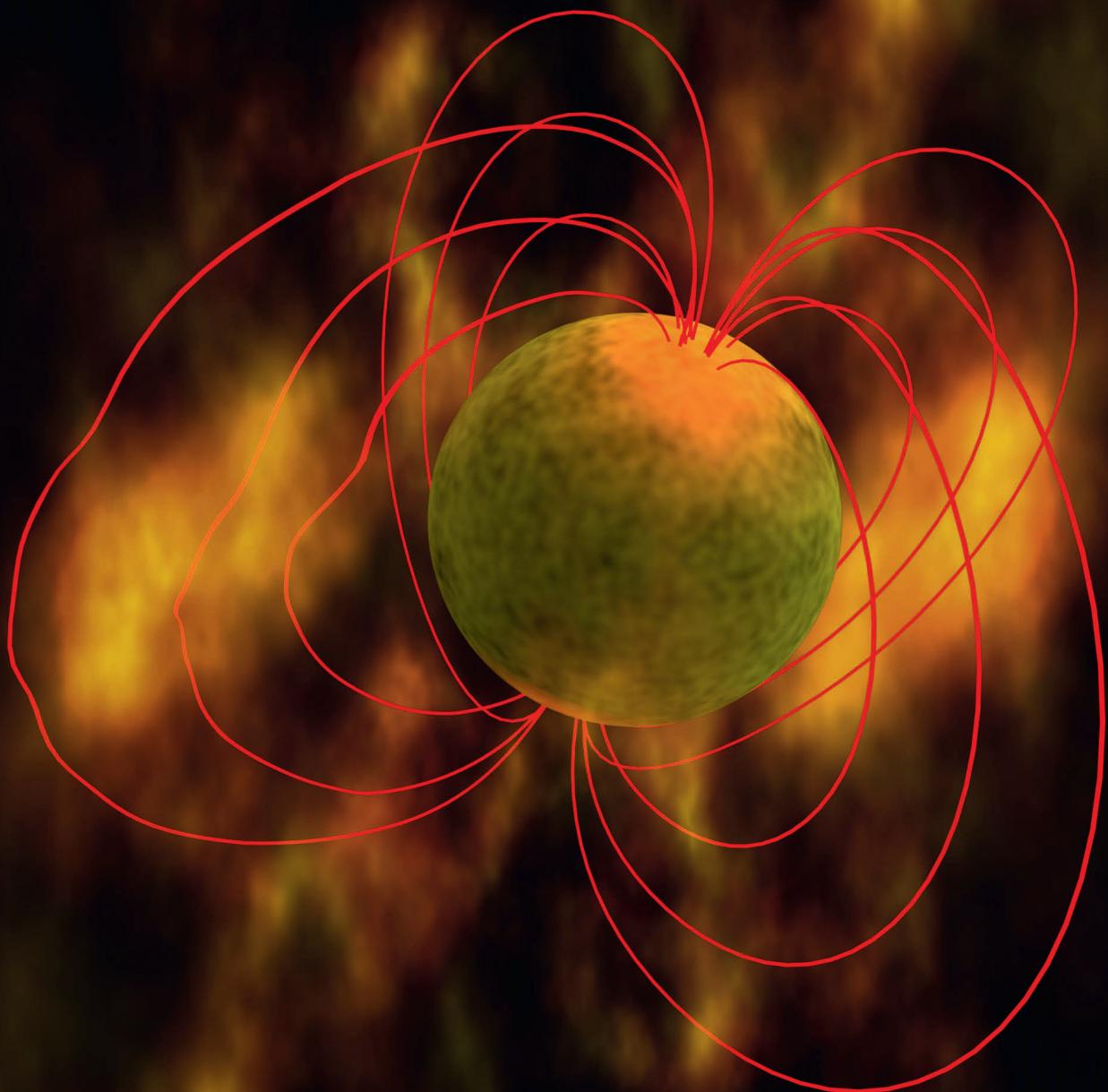
Doch die Magnetare schlagen alles. Die extrem dicht gepackten, etwa 20 Kilometer großen Überbleibsel von Supernovae drehen sich schnell um ihre Achsen. Während der Geburt eines solchen Neutronensterns wird nicht nur die Materie gewaltig zusammengequetscht, sondern auch das Magnetfeld stark komprimiert, das ein Dynamoeffekt kurz nach dem Kollaps noch weiter verstärken kann.

So erreichen diese Sternleichen Feldstärken, die denen von 100 Milliarden handelsüblichen Stabmagneten entsprechen. „Ein Magnetar in Mondent-

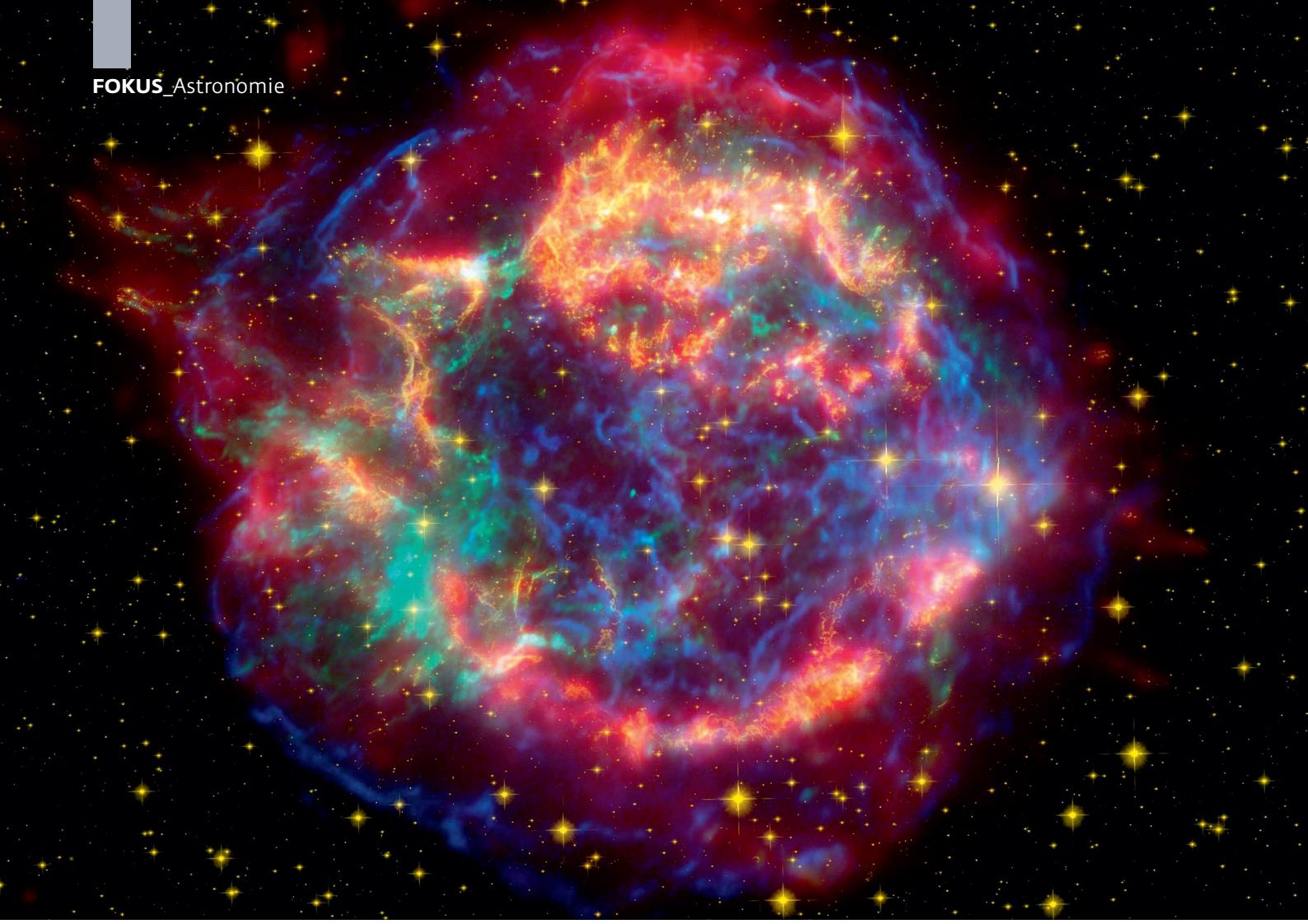
fernung würde Ihnen alle Daten von Ihrer Kreditkarte in der Hosentasche löschen“, sagt Michael Gabler. Für interstellare Raumschiffe könnten diese Sterne also eine echte Gefahr bedeuten. Aber der Forscher am Max-Planck-Institut für Astrophysik interessiert sich weniger für Fiktion. Denn die Magnetare sind auch für die Wissenschaft spannend genug.

Die Gebilde haben eine bewegte Geschichte. Sie entstehen beim spektakulären Tod einer Sonne, einer Supernova. Dabei ist ein Stern zwischen acht und 20 Sonnenmassen in die Energiekrise geraten. Der Brennstoff, der die Kernfusion über Jahrtausende speiste, ist aufgebraucht. Der nukleare Ofen erlischt. Die Kugel besteht jetzt wie eine Zwiebel aus Schalen aller möglichen chemischen Elemente, die während der Fusion erzeugt wurden. Schließlich bildet sich im Zentrum ein Eisenkern. Dichte und Temperatur nehmen weiter zu, bis die Eisenatome förmlich verdampfen.

Die Gravitation übt einen stetig wachsenden Druck aus, dem der etwa erdmondgroße Kern irgendwann nicht mehr standhält: Er kollabiert in Bruch-



Kosmische Kugel: Magnetare sind extrem dicht gepackte, rotierende Neutronensterne und besitzen außergewöhnlich starke Magnetfelder.



teilen von Sekunden. Die Materie stürzt auf das Zentrum zu, das gleichzeitig weiter komprimiert – so lange, bis sie zurückprallt. Ähnlich wie bei einer Feder, die man erst zusammendrückt und dann loslässt, entweicht die Energie schlagartig nach außen und reißt die Materie ins freie All mit. Im Überrest der zentralen Kugel von 1,4 Sonnenmassen herrscht eine Dichte wie im Innern eines Atomkerns. Das ist die Geburtsstunde des Neutronensterns. (Wo bei das Wort *Geburtsstunde* reichlich übertrieben ist, denn all das passiert innerhalb von Millisekunden.) Der Neutronenstern heizt sich auf Temperaturen bis zu 500 Milliarden Grad auf und produziert eine Unmenge an Neutrinos.

Diese Neutrinos – elektrisch neutrale Teilchen mit extrem wenig Masse, die kaum mit Materie wechselwirken – sind für den Explosionsprozess von essenzieller Bedeutung. Denn die nach außen rasende Stoßwelle, die den Stern zerfetzen sollte, läuft sich nach wenigen Hundert Kilometern tot. Die Neutrinos hingegen transportieren so viel Energie

vom Kern zur Stoßwelle, dass die Sternhülle schließlich doch weggeschleudert wird. Eine Supernova leuchtet auf.

EINE SUPERNOVA EXPLODIERT IN DREI DIMENSIONEN

Das exakte Szenario einer solchen kosmischen Katastrophe mit Neutrinoheizung ist weitaus komplizierter und Gegenstand intensiver Forschungen, auch am Garching Max-Planck-Institut für Astrophysik. Mit Supercomputern versuchen die Wissenschaftler dort, Sternexplosionen im Modell nachzustellen. Im Jahr 2014 gelang einer Gruppe um Thomas Janka zum ersten Mal die Simulation einer Supernova in drei Dimensionen mit sämtlichen physikalisch wichtigen Effekten.

Michael Gabler widmet sich dem, was nach dem flammenden Inferno übrig bleibt: den Neutronensternen. „Deren Eigenschaften lassen sich im irdischen Labor nicht nachvollziehen“, sagt er. Allein die Dichte übersteigt jene eines Atomkerns. Und ein würfelzucker-

großes Stück Sternmaterie würde auf der Erde nicht weniger als eine Milliarde Tonnen wiegen.

Wie ist ein Neutronenstern vom Durchmesser einer Stadt wie München beschaffen? Welche Wechselwirkungen haben die kleinsten Bestandteile der Sternmaterie, also Neutronen, Protonen und Elektronen, aber auch so exotische Partikel wie Pionen, Kaonen und Quarks? „Um Antworten auf solche Fragen zu gewinnen, müssen wir den Aufbau eines Neutronensterns verstehen“, sagt Gabler. Und dabei helfen Magnetare.

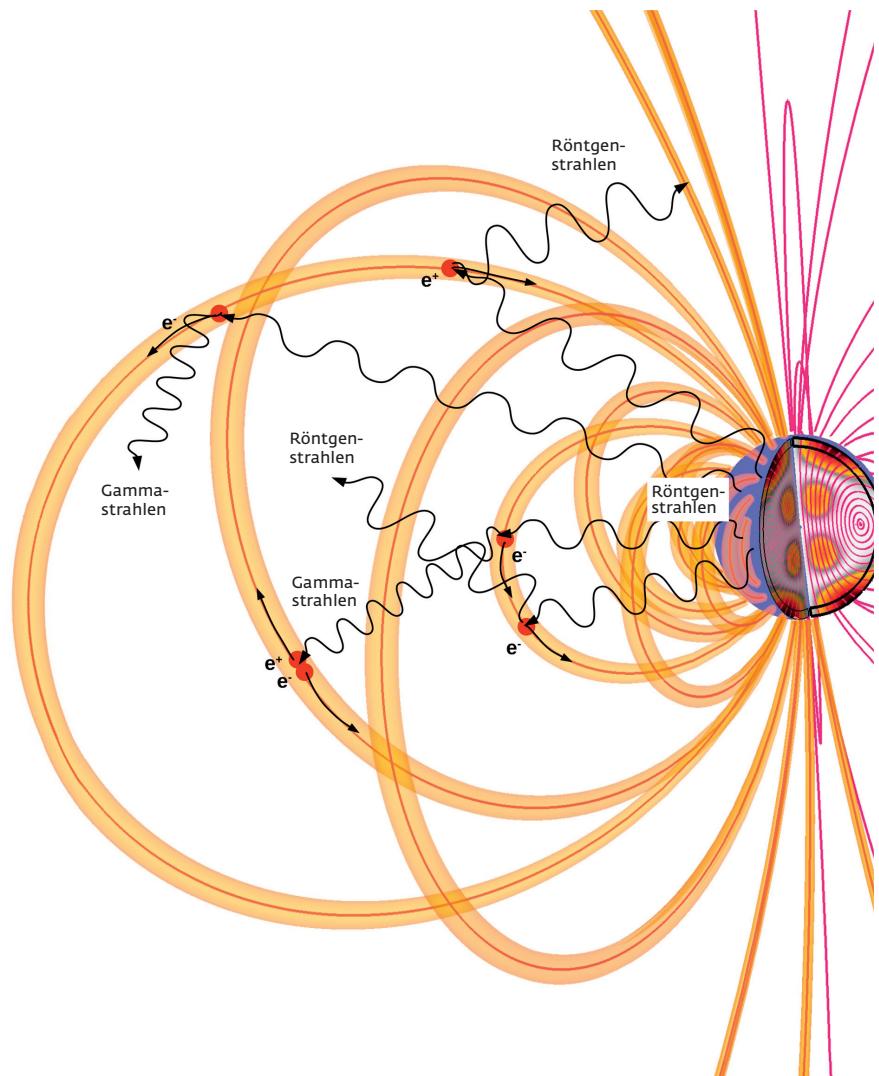
Diese Gebilde sind die stärksten Magneten im Universum. An ihren Oberflächen erreichen die Magnetfelder Werte bis zu einigen Billiarden Gauß. Zum Vergleich: Das irdische Magnetfeld bringt es gerade mal auf ein Gauß, im Labor lassen sich Magnetfelder von maximal zehn Millionen Gauß erzeugen. Allerdings gibt es doch eine Ähnlichkeit zwischen Erde und Magnetaren: Beide besitzen ein starkes magnetisches Dipolfeld. Und der Entstehung der beiden Felder liegt der Dynamoeffekt zugrunde,

Linke Seite: Gau im All: Wenn einem massereichen Stern der Brennstoff ausgeht, kollabiert er und wird bei der folgenden Explosion förmlich in Fetzen gerissen. Den Überrest einer solchen Supernova zeigt diese kombinierte Falschfarbenaufnahme aus Bildern im Röntgen- und Infrarotbereich sowie im Optischen. Das Licht des Cassiopeia A genannten Objekts erreichte die Erde um das Jahr 1680.

Diese Seite: Neutronensterne – insbesondere Magnetare – sind von starken Magnetfeldern umgeben. Entlang der Feldlinien (magenta) fließen elektrische Ströme (gelb), die hauptsächlich aus Elektronen (e^-) und Positronen (e^+) bestehen. Die Röntgenstrahlung der Sternoberfläche wird an diesen Ladungsträgern gestreut. Die gelegentlich daraus resultierende hochenergetische Gammastrahlung kann weitere Elektron-Positron-Paare erzeugen.

der jeweils auf der Bewegung von leitfähiger Materie beruht. Im Fall der Erde ist es im Wesentlichen das flüssige Eisen im Kern, beim Neutronenstern die ultradichte Materie. „Die Sterne sind sehr heiß, Neutrinos führen die Energie ab. Dadurch existiert eine hohe innere Dynamik“, sagt Gabler.

Dazu kommt, dass der Vorläuferstern ja ebenfalls über ein mehr oder weniger starkes Magnetfeld verfügte,



das beim Kollaps komprimiert und in den Neutronenstern gleichsam eingebettet wurde. Eine wichtige Rolle spielt nicht zuletzt die Rotation. Denn der stellare Dipol sendet Energie aus, die er aus der Umdrehung gewinnt. Und dadurch lässt sich ein Neutronenstern überhaupt erst beobachten. Andernfalls wäre ein 20 Kilometer großes, einige Hundert oder Tausend Lichtjahre entferntes Objekt selbst mit den besten Teleskopen gar nicht zu sehen.

Entlang der Magnetfeldachse sendet der rotierende Neutronenstern einen eng gebündelten Strahlungskegel aus. Ähnlich einem Leuchtturm, streift dieser Kegel durch den Raum. Überstreicht er dabei die Blickrichtung zur Erde, sehen die Astronomen ein rhythmisches Blinken, dessen Frequenz der Rotationsperiode des Sterns entspricht. Im Jahr 1967 spürte Jocelyn Bell in England durch Zufall das erste derartige Objekt auf.

Mehr als 2200 dieser Pulsare kennen die Forscher heute. Ihre Strahlung deckt das gesamte elektromagnetische Spektrum ab und reicht von den Radiowellen bis hin zum Gammalicht (MAX-PLANCKFORSCHUNG 3/2013, Seite 48 ff.). Etwa zehn Prozent aller beobachteten Neutronensterne gehören zur Familie der Magnetare. Diese treten allerdings nur als sehr schwache Pulsare auf. Die Ursache dafür liegt in ihrer Drehgeschwindigkeit: „Aus der Pulsfrequenz können wir ableiten, dass Magnetare im Gegensatz zu vielen anderen Neutronensternen in der Regel sehr langsam rotieren“, erklärt Michael Gabler. Die Werte rangieren zwischen zwei und zehn Sekunden pro Umdrehung.

Wie bereits erwähnt, strahlt der Dipol auf Kosten der Rotation elektromagnetische Energie ab. Kurz: Die Rotationsgeschwindigkeit nimmt stetig ab. Tatsächlich beobachten die Astronomen eine solche Verlangsamtung, die sich in den Pulsen bemerkbar macht; bei Magnetaren beträgt sie typischerweise rund drei Millisekunden pro Jahr. >

Überbleibsel: Ein Ring aus Materie, die bei einer Supernova ausgestoßen wurde, umgibt den Neutronenstern SGR 1900+14.





Experte für Außerirdisches: Am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching studiert Michael Gabler die Eigenschaften einer speziellen Sorte von Neutronensternen, Magnetare genannt.

Die Verlangsamung lässt sich in Abhängigkeit von der Zeit auftragen. Aus einem derartigen „Perioden-Periodenveränderungsdiagramm“ berechnen die Experten direkt die Stärke des Magnetfelds. Dabei gilt: Je größer die Abnahme der Pulsfrequenz, desto stärker das Magnetfeld. Auf diese Weise finden die Forscher rasch heraus, ob ein beobachteter Pulsar zu den Magnetaren gehört. Gabler und seine Kollegen nutzen vor allem die Daten des Gammastrahlensatelliten *Swift* und des Röntgensatelliten *Rossi*.

FELDLINIEN VERDRILLEN SICH WIE GUMMIBÄNDER

Aus den Beobachtungen lassen sich auch Masse und Radius des Neutronensterns ableiten. Erstere liegt bei maximal zwei Sonnenmassen und kann aus einfachen Gesetzen der Himmelsmechanik bestimmt werden, falls der Stern Partner in einem Binärsystem ist. Der Radius entzieht sich der direkten Messung, die Astrophysiker müssen seinen Wert über Umwege – etwa die variierende Lichtintensität – erschließen.

Haben die Wissenschaftler einen Magnetar erst einmal im Fokus, dann sind weitere Messungen über einen längeren Zeitraum hinweg lohnenswert. So zeigen beispielsweise manche dieser Himmelskörper gelegentlich gigantische Explosionen, meist im Gamma- und Röntgenbereich. Diese deuten auf den katastrophalen Zusammenbruch und die anschließende Reorganisation des äußeren Magnetfelds hin. Denn der Neutronenstern besitzt noch ein zweites, inneres Magnetfeld. Dieses zwingt dem Feld außerhalb im Lauf der Zeit

» Tief im Herzen eines Neutronensterns liegt die Dichte beim Dreifachen jener eines Atomkerns, die Temperatur bei rund einer Milliarde Grad.

seine Konfiguration auf, weshalb sich die äußersten Feldlinien mehr und mehr wie Gummibänder verdrillen.

„Irgendwann ist die Spannung zu groß, die Linien brechen abrupt auf und ordnen sich neu. Diese Rekonexion liefert die gemessene Strahlung“, sagt Gabler. Dabei entsteht eine Art Feuerball aus heißem Plasma, der im Magnetfeld festgehalten wird. Während der wenigen Zehntelsekunden, die ein derartiger Ausbruch dauert, setzt der Stern so viel Energie frei wie unsere Sonne in 1000 Jahren.

Den Ausbrüchen folgen bei einigen Objekten nach Stunden oder Jahren weitere, weniger starke. Auch im Fall eines solchen *Soft Gamma-Ray Repeater* spielt das starke Magnetfeld eine Rolle. Offenbar wirkt es auf die Kruste des Neutronensterns ein, die dadurch in Bewegung gerät, vielleicht sogar an der einen oder anderen Stelle bricht.

Woher weiß man das? Jede Explosion verändert das Licht des Objekts, das heißt, die Astronomen registrieren in seinem Röntgenspektrum eine Anzahl bestimmter Frequenzen. Der Theorie zufolge stammen sie von Schwingungen des Neutronensterns. Analog der Seismologie, die Erdbebenwellen untersucht, oder der Helioseismologie, die Schwingungen auf der Sonne studiert, sollte sich mittels der Asteroseismologie der Aufbau eines Neutronensterns analysieren lassen. Tatsächlich besteht die Aufgabe nun darin, am Rechner einen Neutronenstern zu bauen, der die registrierten Frequenzen liefert. „In ihren Größenordnungen passen die Frequenzen sehr gut zu elastischen Scherschwingungen der Sternkruste“, sagt Gabler.

Darüber hinaus beobachten die Astrophysiker einen weiteren Typ, Alfvénschwingungen genannt. Diese Art magnetischer Wellen kommt auch auf der Sonne vor, wo sie offenbar mithelfen, die äußere Atmosphäre (Korona) aufzu-

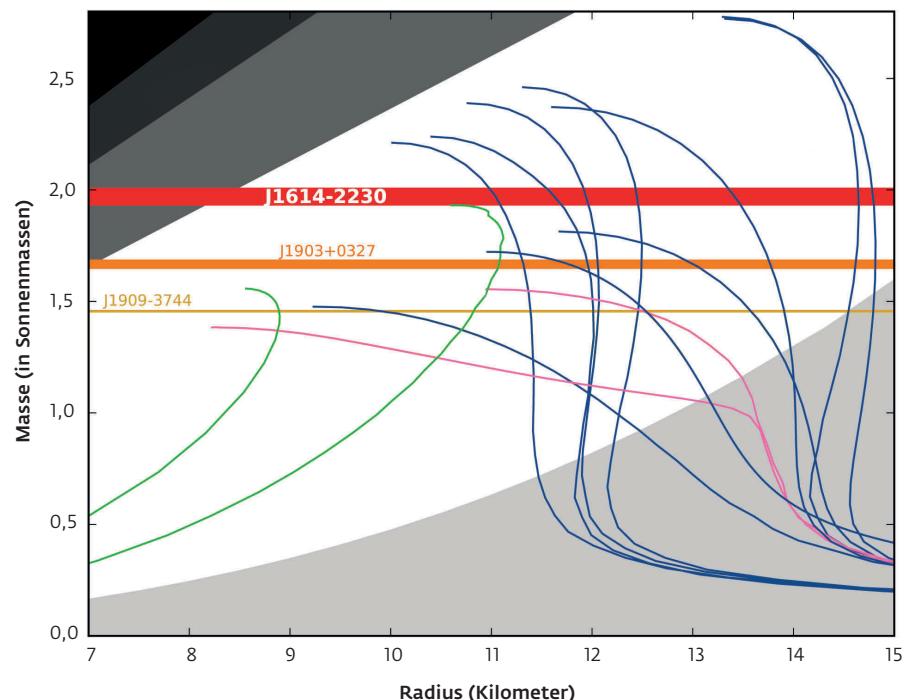
heizen. Im Fall der Neutronensterne beschränken sich die Alfvénschwingungen nicht auf die Kruste, sondern liefern auch Informationen über den flüssigen Kern. Dazu später mehr.

DIE SCHWINGUNGEN KÜNDEN OFFENBAR VON STERNBEBEN

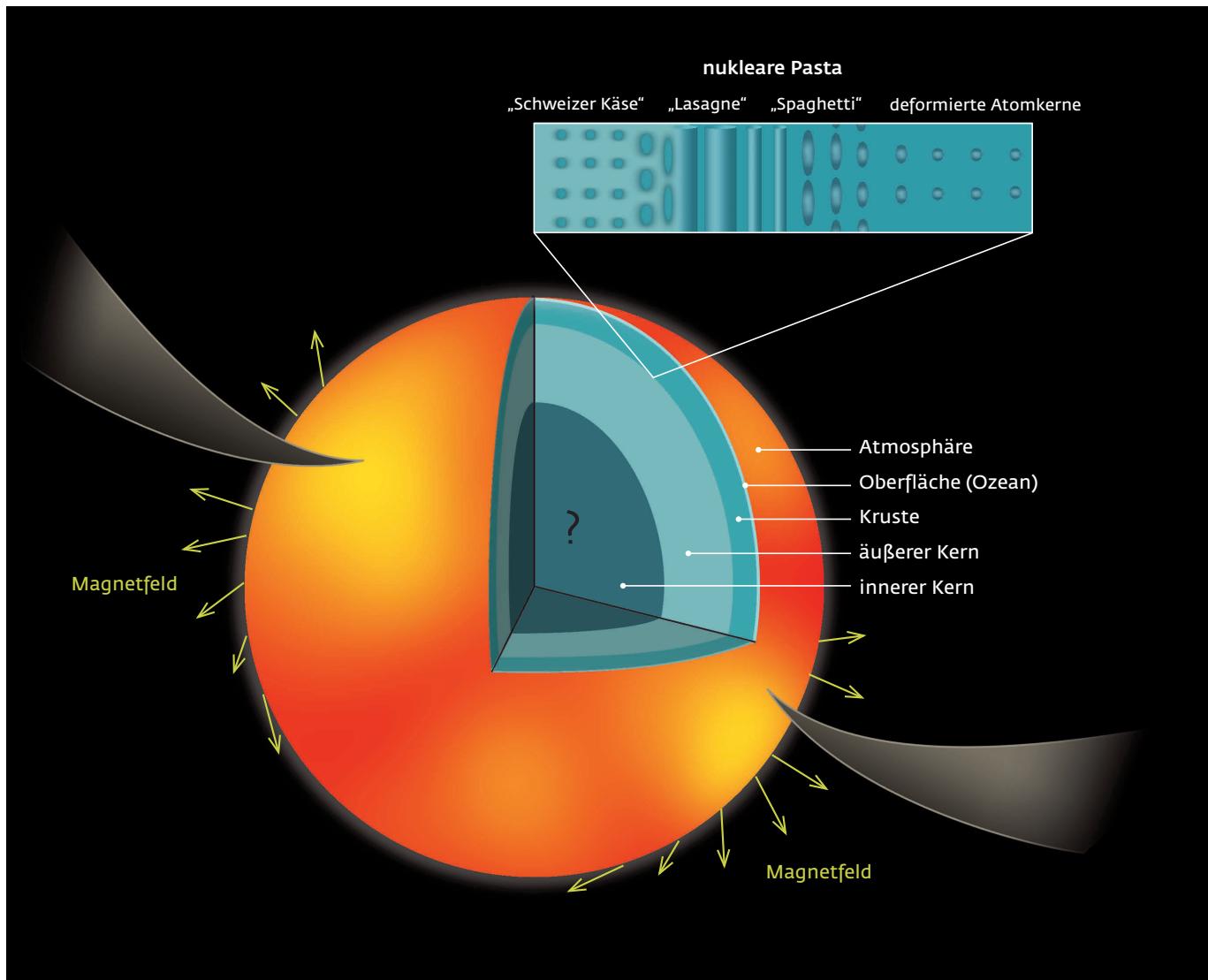
Michael Gabler und Kollegen aus anderen Instituten haben ein Modell entwickelt, in welchem sie die beiden genannten Schwingungsarten miteinander koppeln. Computersimulation-

nen zeigen, dass die Schwingungen sehr gut zu der Annahme von Sternbeben passen. Außerdem hängt die Stärke der Kopplung vom Magnetfeld ab: Für schwache Magnetfelder dominieren die Scherschwingungen in der Kruste, für starke Felder die Alfvénwellen im Kern.

Kern, Kruste, Magnetfelder – wie sieht das Innere eines Neutronensterns denn nun aus? Tief im Herzen, so das von den meisten Forschern akzeptierte Modell, liegt die Dichte beim Dreifachen jener eines Atomkerns, die Tem-



Das Diagramm zeigt jeweils das Verhältnis von Masse und Radius der Neutronensterne J1640-2230, J1903+0327 und J1909-3744. Die Kurven geben unterschiedliche Zustandsgleichungen wieder, die bei bestimmten Radien entsprechende Massen liefern. Nur wenn eine Kurve den Balken des jeweiligen Neutronensterns kreuzt – also seine Masse erreicht oder übersteigt –, kann die zugehörige Zustandsgleichung den Stern richtig beschreiben. Die Farben der Kurven bedeuten, dass in den Zustandsgleichungen verschiedene Materieformen angenommen wurden: Blau steht für Nukleonen (Protonen und Neutronen), Magenta für Nukleonen plus exotische Materie und Grün für seltsame Quarkmaterie.



In Schalenform: Der Aufbau von Neutronensternen gleicht den Schichten einer Zwiebel. Tief im Innern lässt sich die Materie allenfalls mit den Gesetzen der Quantenmechanik beschreiben, möglicherweise ist sie ein Gemisch aus freien Quarks und Gluonen. Der äußere Kern besteht zu 95 Prozent aus Neutronen, den Rest machen Protonen und Elektronen aus. Daran schließt sich eine „nukleare Pasta“ an, in der die Atomkerne zu Spaghettiform auseinandergezogen sind; diese Spaghetti gleichen weiter innen den Scheiben einer Lasagne, und noch weiter Richtung Kern ähnelt die Struktur einem Schweizer Käse. Die Kruste des Neutronensterns besteht aus einem geordneten Kristallgitter, wie man es in irdischen Festkörpern findet. Die Oberfläche ist vermutlich von einem wenige Zentimeter dicken Ozean aus flüssiger Materie bedeckt, an den sich zum Weltall hin eine noch dünnere Atmosphäre aus heißem Plasma anschließt.

peratur bei rund einer Milliarde Grad. Unter diesen Bedingungen lässt sich die Materie allenfalls mit den Gesetzen der Quantenmechanik beschreiben, Zustand und Zusammensetzung sind weitgehend unbekannt. Möglicherweise besteht dieser innerste Kern aus einem Gemisch aus freien Quarks und Gluonen, den Grundbausteinen der Materie. Eine andere Idee setzt ins Zentrum so exotische Teilchen wie Pionen oder Kaonen; bei beiden handelt es sich

um Mesonen, instabile Partikel, die jeweils aus einem Quark-Antiquark-Paar aufgebaut sind.

Im äußeren Kern wird es ein wenig übersichtlicher: „Dort existieren Neutronen und Protonen direkt nebeneinander“, erklärt Michael Gabler. Die Neutronen stellen mit einem Anteil von etwa 95 Prozent das Gros der Materie, Protonen und Elektronen machen den Rest aus. Die Protonen sind supraleitend, also ohne elektrischen Widerstand.

Für die Neutronen liefert Gablers magneto-elastisches Modell ebenfalls einen außergewöhnlichen Zustand: Sie scheinen supraflüssig zu sein. Demnach besitzen sie keine innere Reibung (keine Viskosität) und weisen eine unendlich hohe Wärmeleitfähigkeit auf. Im irdischen Labor kann man die Suprafluidität nur bei extrem niedrigen Temperaturen und wenigen Elementen beobachten; bei Helium etwa tritt sie bei minus 270 Grad Celsius auf.

» Das Magnetfeld ist an den Magnetar gebunden und rotiert mit ihm. In einigen Tausend Kilometern Abstand von der Oberfläche erreicht es praktisch Lichtgeschwindigkeit.

Was sich an den Kern nach außen anschließt, nennen die Experten „nukleare Pasta“. Im äußereren Bereich dieser Zone sind die Atomkerne zu Spaghetti-form auseinandergezogen. Weiter innen bilden diese Spaghetti so etwas wie Scheiben, die in ihrem Aufbau einer Lasagne gleichen. Noch weiter in Richtung Kern werden die Spaghetti unter zunehmendem Druck zu einer gleichförmigen Teigmasse zusammengepresst, in der nur noch wenige Freiräume bleiben. „Das Ganze ähnelt hier einem Schweizer Käse“, sagt Gabler.

DER OZEAN AN DER OBERFLÄCHE SCHWAPPT HIN UND HER

Die gesamte Kruste ist etwa einen Kilometer dick und besteht aus einem geordneten Kristallgitter, wie man es in irdischen Festkörpern findet. Die Eisenatomkerne dort sind jedoch sehr neutronenreich, auf 50 Protonen kommen gut zehnmal so viele Neutronen. Diese werden in tieferen Schichten wegen des starken Drucks aus den Atomkernen gepresst und können sich im Kristallgitter frei bewegen. In der gesamten Kruste schwirren außerdem Elektronen umher.

Zum freien Weltraum hin bildet vermutlich eine wenige Mikrometer dünne Atmosphäre aus heißem Plasma die äußerste Schicht. Darunter vermuten die Fachleute einen lediglich ein paar Zentimeter dünnen Ozean aus flüssiger Materie. Diese besteht aus Wasserstoff oder aus allen möglichen Elementen, die der Neutronenstern von einem eventuellen Begleitstern ansaugt und die sich auf der Oberfläche sammeln. Allein die starke Gravitationskraft hält Atmosphäre und Ozean fest. Im Licht von Neutronensternen haben die Astronomen winzige Oszillationen beobachtet, die darauf hindeuten, dass der Ozean womöglich hin- und herschwapppt. Die Experten sind

sich jedoch nicht sicher, ob Magnetare überhaupt einen Ozean haben.

Hingegen verfügt jeder Neutronenstern über ein Magnetfeld, in dem sich Partikel wie Elektronen und ihre positiv geladenen Antiteilchen, die Positronen, bewegen. Das Magnetfeld ist an den Stern gebunden und rotiert mit ihm – je größer der Abstand, desto schneller. In einigen Tausend Kilometern Distanz erreicht das Magnetfeld praktisch Lichtgeschwindigkeit. Jenseits dieses sogenannten Lichtradius öffnen sich die Magnetfeldlinien, Elektronen und Positronen können entweichen.

„Das externe Magnetfeld dreht sich aber nicht nur mit dem Stern. Eines unserer Modelle beschreibt, wie es an das Magnetfeld im Sterninnern gekoppelt

ist“, sagt Michael Gabler. Sein Fazit: „Bei Sternbeben schwingt auch das externe Magnetfeld, wodurch in der Magnetosphäre sehr starke elektrische Ströme auftreten.“ An den Ladungsträgern dieser Ströme – Elektronen und Positronen – werden die bei einem Gammaausbruch freigesetzten Photonen gestreut. „Diese Streuung kann die beobachteten Frequenzen in der harten Röntgenstrahlung erklären“, sagt der Max-Planck-Wissenschaftler.

Gerade dieses Beispiel zeigt, dass die Theorie über Aufbau und Struktur von Neutronensternen so falsch nicht sein kann. Dennoch bleiben etliche Fragen ungeklärt. Magnetare werden Forscher wie Michael Gabler auch in Zukunft anziehen. ▶

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

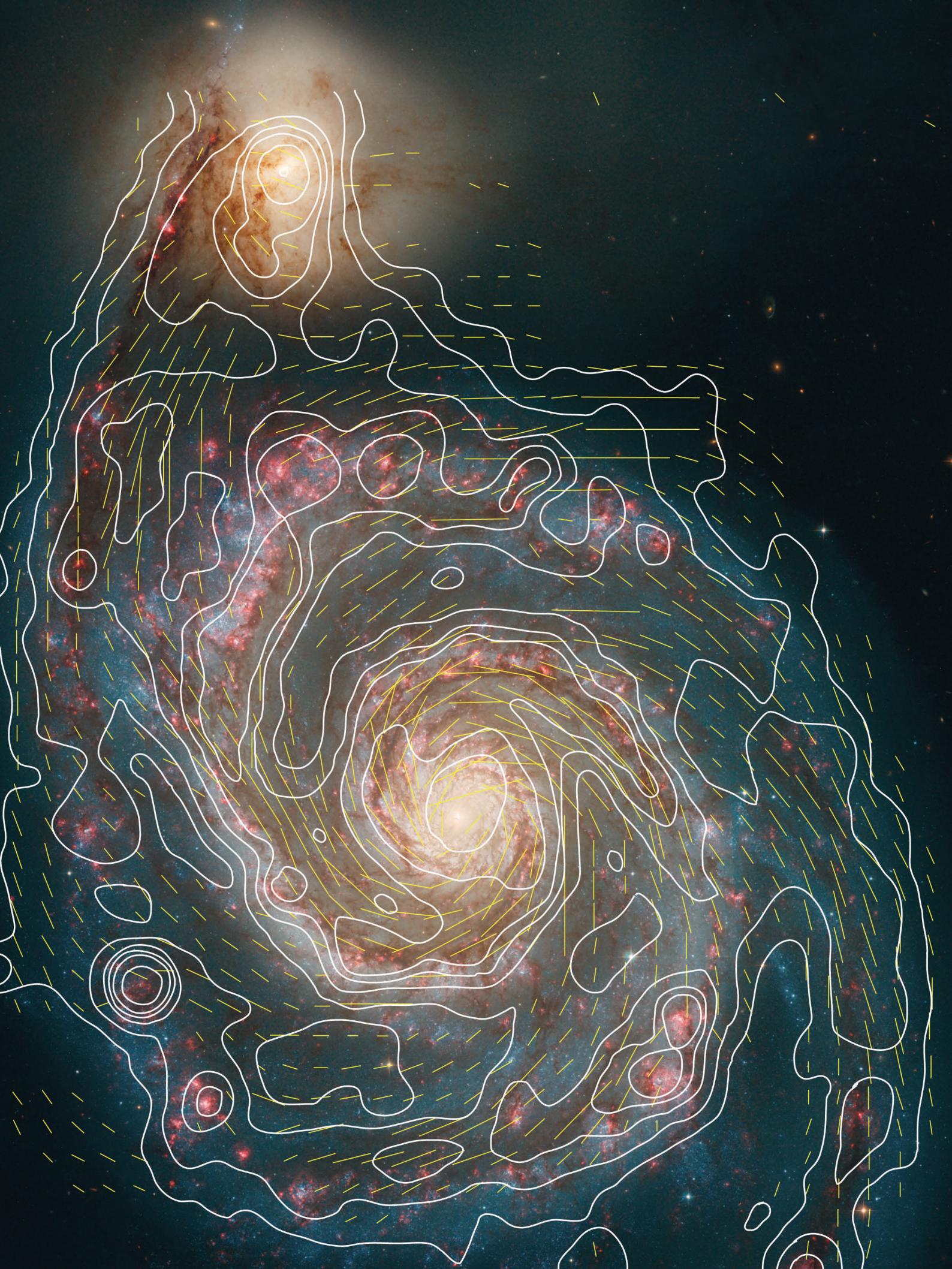
- Neutronensterne sind die unvorstellbar dichten Überreste von Supernovae. Nur etwa 20 Kilometer im Durchmesser, rotieren sie schnell um ihre Achsen, senden dabei Strahlungskegel ins All und werden dadurch als Pulsare sichtbar.
- Etwa zehn Prozent aller Neutronensterne besitzen starke Magnetfelder; diese Sterne heißen daher Magnetare.
- Magnetare zeigen gelegentlich heftige Strahlungsausbrüche, die auf den katastrophalen Zusammenbruch und die Neuorganisation des äußeren Magnetfelds zurückgehen.
- Bei den Explosionen schwingen die Neutronensterne. Diese Schwingungen lassen sich indirekt beobachten und geben letztlich Aufschluss über Aufbau und Zusammensetzung des Sterns.

GLOSSAR

Binärsystem: Vermutlich mehr als die Hälfte aller Sterne innerhalb der Milchstraße kommt in Doppel- oder Mehrfachsystemen vor. In einem Doppelsternsystem etwa umkreisen zwei Sterne einen gemeinsamen Schwerpunkt. Aus den Bahndaten lassen sich die Massen der beiden Partner bestimmen.

Dipol: Zwei räumlich getrennt auftretende Pole mit jeweils unterschiedlichem Vorzeichen (+, -). Das können elektrische Ladungen oder magnetische Pole gleicher Größe sein. Ein einfaches Beispiel für einen Dipol und sein Feld ist ein Stabmagnet.

Dynamoeffekt: Die Erzeugung eines Magnetfelds im Innern eines Himmelskörpers (Planet oder Stern) durch elektromagnetische Induktion. Diese entsteht aufgrund der Wechselwirkung zwischen der Bewegung eines Stoffes (Konvektion) in elektrisch leitender Materie und rascher Rotation.



Kräfte, die in Galaxien walten

Magnetfelder durchziehen auf Größenskalen von 100 000 Lichtjahren ganze Galaxien und umgeben deren zentrale Schwarze Löcher. Forscherinnen und Forscher um **Rainer Beck, Silke Britzen** und **Sui Ann Mao** am **Max-Planck-Institut für Radioastronomie** in Bonn entlocken den unsichtbaren Kraftfeldern ihre Geheimnisse.

TEXT THOMAS BÜHRKE

Kaum jemand wird sich der Faszination des riesigen Radioteleskops in Effelsberg entziehen können. Mit einem Durchmesser von 100 Metern ist es das weltweit zweitgrößte frei schwenkbare Beobachtungsgerät seiner Art. Mit diesem gigantischen Ohr wollte Rainer Beck schon als Student ins Universum hinaushorchen. Das war der Beginn einer Forscherkarriere. Heute, fast 40 Jahre später, ist der Wissenschaftler längst etabliert. Kaum ein anderer kennt sich mit Magnetfeldern in Galaxien so gut aus wie er. Allerdings stand am Anfang ein Rückschlag.

Sein Doktorvater, der damalige Max-Planck-Direktor Richard Wielebinski, hatte im Jahr 1973 zusammen mit seiner Mitarbeiterin Elly Berkhuijsen in der benachbarten, rund zweieinhalb Millionen Lichtjahre entfernten Andromedagalaxie erstaunlich intensive Radiostrahlung gefunden. Die musste von schnellen Elektronen stammen, die sich in verhältnismäßig starken Magnetfeldern bewegen. „Damit hatte damals niemand

Magnetische Strudelgalaxie: Auf dieser Abbildung des Milchstraßensystems M 51 kennzeichnen weiße Konturlinien die Intensität der Radiostrahlung, gelbe Striche die Magnetfeldorientierung.

gerechnet“, erinnert sich Beck. Daher war das Ergebnis spektakulär. Es wurde seitdem von Beck und seinen Studenten mehrfach bestätigt und verbessert. Und im Jahr 1999 gelangte es auf einer Sonderbriefmarke der Deutschen Bundespost sogar zu ungeahnter Ehre.

Rainer Beck sollte nun im Rahmen seiner Doktorarbeit in einer anderen Spiralgalaxie namens Messier 51 ebenfalls nach Radiostrahlung suchen. „Das ging aber völlig daneben, weil das Sternensystem für die damalige Detektortechnik zu weit entfernt war“, sagt der Wissenschaftler. Doch davon ließ er sich nicht abschrecken.

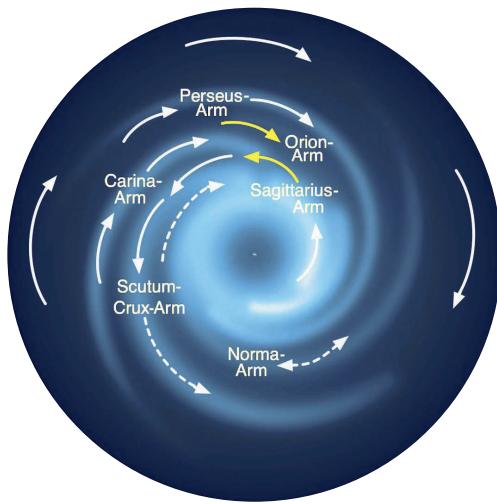
DIE FELDLINIEN FOLGEN DEN SPIRALARMEN

Bis heute hat die Gruppe um Beck und Marita Krause viele Galaxien im Radiobereich studiert – inzwischen auch erfolgreich M 51. Magnetkarten zeigen, dass die Linien des geordneten Feldes dem Verlauf der Spiralarme folgen, sich an deren Krümmung gleichsam anschmiegen. Auf den genauesten Karten ist zu sehen, dass die Magnetfeldstärke häufig an den Innenkanten der Arme am größten ist, aber auch zwischen ihnen existieren geordnete Felder.

M 51 – auch Whirlpool- oder Strudelgalaxie genannt – ist zudem ein sehr gutes Beispiel dafür, wie Magnetfelder von außen beeinflusst werden. Eine nahe Begleitgalaxie verursacht mit ihrer Schwerkraft im Gas von M 51 starke Dichtewellen mit der Folge, dass die Spiralarme besonders ausgeprägt sind und deutlich hervortreten. Gleichzeitig komprimieren die Wellen auch das Magnetfeld an den Innenkanten der Spiralarme.

„Wir sehen hier einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Gasdichte und der Stärke des Magnetfeldes“, erläutert Beck. Das ist auch insofern interessant, als in solchen verdichteten Regionen neue Sterne entstehen können. Welchen Einfluss die Magnetfelder auf die Gaswolken und Sterngeburen darin haben, diskutieren Astronomen schon seit Jahrzehnten.

Neue Sterne entstehen im Innern von dichten rotierenden Wolken, die sich unter dem Einfluss der eigenen Schwerkraft langsam zusammenziehen. Während eine solche Wolke kleiner wird, rotiert sie immer schneller. Dadurch nimmt die nach außen wirkende Zentrifugalkraft zu, die dem Kollaps entgegenwirkt und ihn womöglich gänzlich aufhalten könnte. >

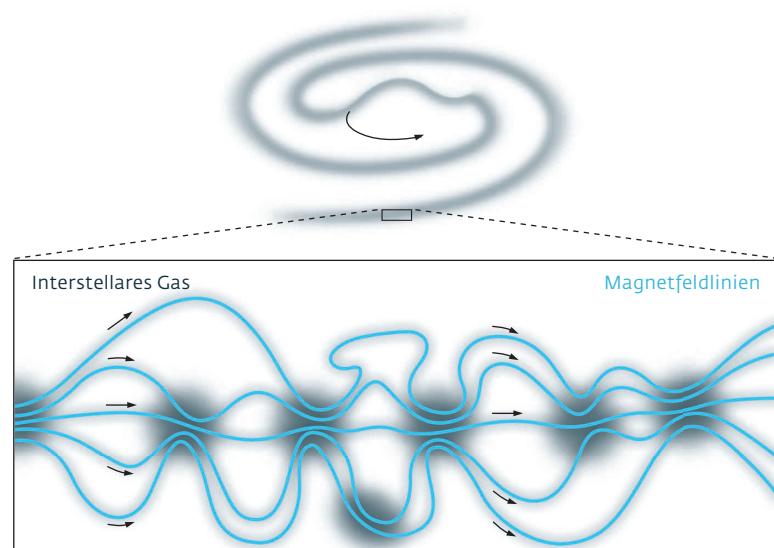


Diese Seite

Modell der Milchstraße: Die Grafik links zeigt die Struktur der geordneten Magnetfelder in den Spiralarmen der Galaxis. Gelbe und weiße Pfeile bedeuten gesicherte, gestrichelte noch unsichere Strukturen. Die beiden gelben Pfeile markieren eine Umkehrung der Magnetfeldrichtung. Die Pfeile ganz außen kennzeichnen die Rotationsrichtung der Milchstraße. Unser Sonnensystem befindet sich etwa in der Mitte des Orionarms.

Rechte Seite

Experten für das Radiouniversum: Sui Ann Mao, Silke Britzen und Rainer Beck (von links) im Kontrollraum des 100-Meter-Teleskops in Effelsberg.



Das Gas erhitzt sich hierbei und wird teilweise ionisiert: Es wird zu einem Plasma, in dem elektrisch geladene Teilchen – vornehmlich Protonen und Elektronen – umherschwirren. Diese reagieren auf das Magnetfeld, zerren an ihm wie Teig an einem Mixer und bremsen die Rotationsbewegung der gesamten Wolke. Die Zentrifugalkraft nimmt ab, und die Wolke kann weiter kontrahieren. Auf diese Weise könnten Magnetfeldbremsen die Sternentstehung unterstützen.

„Trotz jahrzehntelanger Forschung wissen wir aber immer noch verhältnismäßig wenig über den Einfluss von Magnetfeldern auf die Vorgänge im Innern von Galaxien, wie etwa die Bildung von Spiralarmen oder aktiver galaktischer Zentren“, sagt der Max-Planck-Forscher. Zu vernachlässigen sind sie keinesfalls, wie die meisten Astronomen in Becks Anfangsjahren noch meinten.

Während man das Gas und die Sterne in einer Galaxie sehen kann, bleiben Magnetfelder unsichtbar. Wie können wir sie überhaupt erkennen? „Sie müssen beleuchtet werden“, sagt Rainer Beck, „und das übernehmen Elektronen.“

Diese im Raum zwischen den Sternen vorhandenen Teilchen werden in einem Magnetfeld auf schraubenförmige Bahnen gezwungen und senden dabei wie winzige Scheinwerfer in Bewegungsrichtung Radiostrahlung aus. Außerdem sind die Radiowellen linear polarisiert: Sie schwingen bevorzugt in einer Ebene, und zwar senkrecht zur Magnetfeldorientierung. So lassen sich aus der Intensität und der Polarisation der Radiostrahlung die Stärke und die Struktur des Magnetfeldes ermitteln.

ASTRONOMEN NUTZEN EINEN EFFEKT AUS DER NATUR

Hierfür eignet sich das Effelsberger Radioteleskop in einzigartiger Weise: Trotz seines stattlichen Alters von 42 Jahren ist es dank ständiger technischer Verbesserung noch heute das weltweit empfindlichste Instrument zum Nachweis polarisierter Radiostrahlung.

Auch unser Milchstraßensystem ist eine Spiralgalaxie. Da sich unser Sonnensystem mittendrin befindet, empfangen Radioteleskope die Strahlung aus allen Bereichen. Das erschwert ei-

nerseits das Erkennen der räumlichen Struktur. Andererseits ist die Milchstraße die uns am nächsten gelegene Spiralgalaxie und offenbart daher eine Fülle von Details.

Um die räumliche Struktur des Magnetfeldes herauszufinden, wenden die Astronomen hier eine weitere Methode an. Sie beobachten Pulsare und auch ferne Galaxien, die Radiostrahlung aussenden. Durchläuft diese Strahlung ein Magnetfeld, so dreht sich die Polarisationsebene. Dieser Effekt ist nach Michael Faraday benannt, der ihn schon im Jahr 1845 bei Laborexperimenten entdeckte.

Aus dem Grad der Faraday-Drehung schließen die Forscher auf Stärke und Richtung des durchquerten Magnetfeldes. Aus der Entfernung eines Pulsars ergibt sich zudem die mittlere Stärke des dazwischen befindlichen Feldes. „Die Faraday-Rotation ist für uns wie ein kosmisches Kompass“, sagt Beck. Allerdings funktioniert dieser nicht ganz so einfach wie sein Pendant auf der Erde.

Ein Problem besteht darin, dass man zwar eine bestimmte Polarisationsebene der Radiowellen misst, aber nicht



» Je weiter man sich vom Milchstraßenzentrum entfernt, desto mehr verändert sich das Magnetfeld. Im Außenbereich etwa verlaufen die Feldlinien nahezu kreisförmig.

weiß, in welcher Ebene der Pulsar die Wellen ursprünglich ausgesandt hat. Hier kommt den Astronomen zu Hilfe, dass die Welle desto stärker gedreht wird, je größer die Wellenlänge der Radiostrahlung und die Feldstärke sind. Beobachtungen bei mehreren Wellenlängen liefern deshalb Stärke und Richtung des Feldes.

An der bisher genauesten Magnetfeldkarte der Milchstraße hat Sui Ann Mao mitgearbeitet. Die aus Hongkong stammende Radioastronomin forschte einige Jahre an der Universität Harvard in Cambridge (USA), seit Anfang 2014 arbeitet sie am Bonner Max-Planck-Institut. Hier hat sie im Rahmen des Mi-
nerva-Programms eine auf fünf Jahre befristete Stelle erhalten.

Für Mao war dieses Programm, das die Karriere von Wissenschaftlerinnen fördert, mitentscheidend für ihren Umzug nach Deutschland. „Außerdem ist das wissenschaftliche Umfeld hier in

Bonn sehr gut, und ich kann eine eigene Arbeitsgruppe aufbauen“, sagt sie.

Zusammen mit Kollegen vermaß Mao die Faraday-Drehung der Radiostrahlung mithilfe von Pulsaren und fernen Radiogalaxien. Hierfür verwendete sie das *Very Large Array (VLA)*, eine aus 27 Radioantennen bestehende Anlage in New Mexico.

Das Ergebnis der galaktischen Magnetfeldkartierung lässt sich nicht so einfach interpretieren. Doch die Daten passen am besten zu einem Modell, in dem die Magnetfelder im inneren Bereich der Milchstraße – wie bei Messier 51 – den Spiralarmen folgen und symmetrisch zur Mittelebene sind. Hier besitzen sie Stärken bis zu zwei Mikrogauß. Zum Vergleich: Das Erdmagnetfeld ist in mittleren Breiten rund hunderttausendmal stärker.

Je weiter man sich vom Milchstraßenzentrum entfernt, desto mehr verändert sich das Feld. Im Außenbereich

ist es fast azimutal, das heißt, die Feldlinien verlaufen nahezu kreisförmig. Lange haben Astronomen gerätselt, wie eine solche Struktur, die sich in ganz ähnlicher Weise in fast jeder Spiralgalaxie findet, entstehen kann.

„Wir stellen uns das heute in einem mehrstufigen Prozess vor“, sagt Rainer Beck. In einem Elektromagneten erzeugt ein stromdurchflossener Draht ein Magnetfeld. Im Weltall übernehmen turbulenter verwirbelte Plasmen diese Aufgabe. Sie entstehen etwa, wenn Sterne explodieren. Dann stoßen sie heiße Gashüllen ab, die sich mit hohen Geschwindigkeiten ausbreiten. In diesen entstehen zunächst chaotische Magnetfelder. Sie werden dann von der Rotation der Galaxie erfasst und mitgezogen.

Bei diesem Vorgang ordnen sich die Feldlinien nach und nach neu an, bis sie das heute beobachtete Muster ergeben, das den Spiralarmen folgt. „Dieser galaktische Dynamo erzeugt Ord-

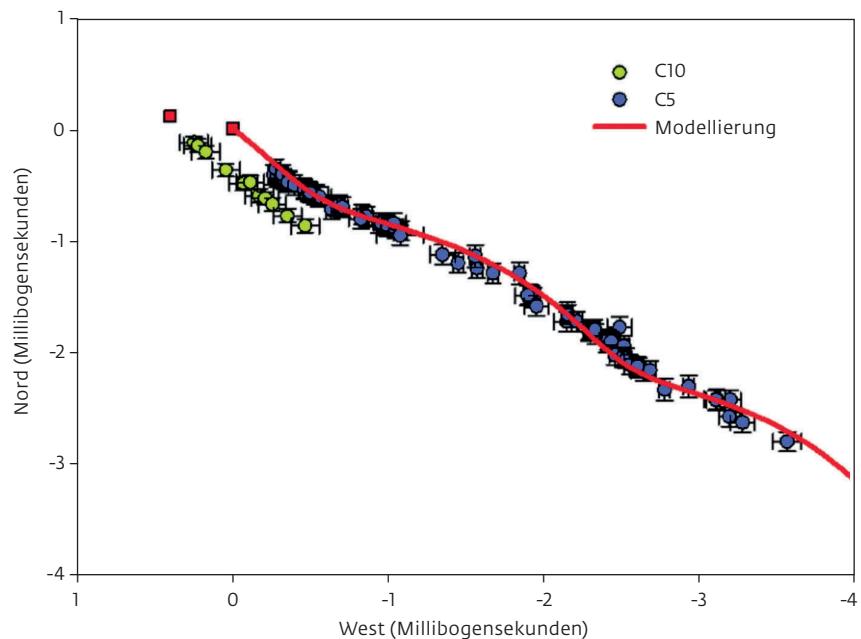


nung aus dem Chaos“, fasst Becks Kollegin Mao diesen auf Skalen von Zehntausenden von Lichtjahren ablaufenden Prozess zusammen. „Dynamo“ deswegen, weil hier Bewegungsenergie in magnetische Energie umgewandelt wird – entfernt vergleichbar mit einem Fahrraddynamo.

Bei den meisten untersuchten Galaxien handelt es sich um ungestörte Einzelgänger. Doch Astronomen wissen, dass die Sternensysteme sich auch gefährlich nahe kommen oder gar zusammenstoßen können. Dann verwirbeln die Gas- und Staubwolken, verdichten sich lokal und werden zu Geburtsstätten vieler neuer Sterne. Was passiert in solchen Fällen mit den Magnetfeldern?

Das prominenteste Beispiel von zwei verschmelzenden Sternensystemen, die 90 Millionen Lichtjahre entfernte Antennengalaxie, untersuchten Beck und Kollegen mit dem VLA. Hierbei kam ihnen eine besondere Eigenschaft dieser Anlage zu Hilfe. Deren Gesamtausdehnung lässt sich nämlich variieren, indem man die 27 auf Schienen gelagerten Teleskope hin und her fährt. „Auf diese Weise realisiert man eine Art Zoomobjektiv für den Radiobereich“, erklärt Beck.

Ohr ins All: Die 100 Meter durchmessende Schüssel des Effelsberger Radioteleskops (oben) lauscht auch nach den Signalen von Quasaren. Von dem Objekt 3C 279 geht ein Jet aus (Grafik unten). Darin entfernen sich zwei Verdichtungen (C5 und C10) vom Quasar. Offensichtlich besitzen sie verschiedene Geburtsstätten (rote Quadrate). Die Modellierung (rote durchgezogene Linie) dieser verschiedenen Bahnen erlaubt die Bestimmung der Parameter eines Doppelsystems zweier supermassereicher Schwarzer Löcher. Kosmische Kollisionen: Bei der Entstehung und Bündelung von Jets spielen Magnetfelder eine zentrale Rolle (rechte Seite, links). In dem verschmelzenden Sternensystem – Antennengalaxie genannt – ist die geordnete Magnetfeldstruktur zerstört (rechte Seite, rechts).





Beim SKA werden in Australien und Südafrika Tausende von Radioantennen mit einer gesamten Sammelfläche von einem Quadratkilometer errichtet.

Tatsächlich stellte er damit fest, dass die Magnetfelder stärker als in normalen Spiralgalaxien sind, insbesondere in der „Knautschzone“ des kosmischen Crashs. Ursachen sind wahrscheinlich die verstärkte Turbulenz im Gas und eine intensive Sternentstehung. Dort ist die geordnete Magnetfeldstruktur zerstört und einer chaotischen gewichen. Mit dem inzwischen erheblich verbesserten VLA hat Sui Ann Mao vor Kurzem neue Messungen vorgenommen, die das magnetische Chaos erklären sollen.

Spannend wäre es, diese Felder lokal mit größerer Detailauflösung zu untersuchen. Doch die heutigen Teleskope stoßen dabei an ihre Grenzen. Große Hoffnungen setzen die Radioastronomen auf das zukünftige *Square Kilometre Array* (SKA). Das ist ein internationales Projekt, bei dem in Australien und Südafrika Tausende von Radioantennen mit einer gesamten Sammelfläche von einem Quadratkilometer errichtet werden. Ein gigantisches Gerät, das im

kommenden Jahrzehnt fertig werden soll und diese Forschung auf lange Zeit dominieren dürfte.

SCHWARZE LÖCHER IN DEN HERZEN DER GALAXIEN

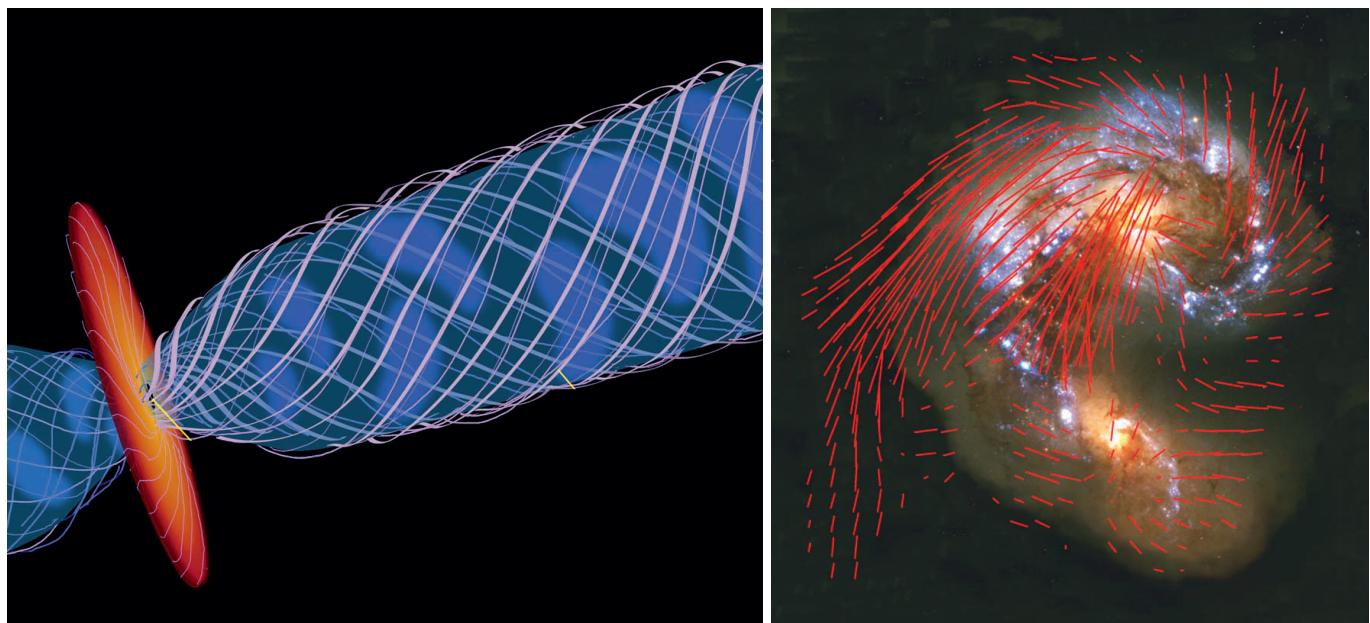
„Mit dem SKA würde etwa die Zahl der Pulsare, die wir für die Magnetfeldkartierung der Milchstraße verwenden, auf 10 000 steigen“, schwärmt Mao. Doch zur großen Überraschung und zum Unmut aller deutschen Radioastronomen hat Bundesforschungsministerin Johanna Wanka im Juni 2014 Deutschlands Ausstieg aus diesem Zukunftsprojekt angekündigt.

Das SKA wäre auch ideal, um einen weiteren Aspekt von Galaxien zu studieren: die Aktivität supermassereicher Schwarzer Löcher in deren Zentren. Nach heutigem Kenntnisstand besitzt fast jede Galaxie in ihrem Herzen ein Schwarzes Loch, das Materie von einigen Millionen bis Milliarden von Son-

nenmassen in sich vereint. Wohl jeder dieser unsichtbaren Körper ist von einer heißen, rotierenden Gasscheibe umgeben, die je nach Bedingungen sehr hell leuchten kann.

In einigen Fällen löst sich Materie aus der Scheibe und strömt auf das Schwarze Loch zu. Während ein großer Teil davon in dem kosmischen Mahlstrom auf Nimmerwiedersehen verschwindet, wird ein anderer Teil umgelenkt und schießt in zwei entgegengesetzten Richtungen senkrecht zu der Scheibenebene mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ins All hinaus. Ein solcher Jet kann mehrere Millionen Lichtjahre weit reichen; vermutlich halten ihn Magnetfelder zusammen. Auf welche Weise diese Plasmaströme entstehen, versucht Silke Britzen herauszufinden.

„Es besteht kaum noch ein Zweifel daran, dass Magnetfelder hierbei eine wichtige, vielleicht sogar die entscheidende Rolle spielen“, sagt die Astrophysikerin. Sie könnten das Gas in der





Scheibe abbremsen – was essenziell wichtig ist, damit es sich auf einer Spiralfahrt dem Schwarzen Loch nähern und schließlich in das Massemonster hineinstürzen kann. Doch was in dessen unmittelbarer Umgebung wirklich passiert, ist noch weitgehend unklar.

So wissen die Forscher nicht, ob in der Gasscheibe auf viel kleineren Skalen ein ähnlicher Dynamo arbeitet wie in der Spiralgalaxie. Denkbar wäre auch, dass sich entgegengesetzt gepolte Magnetfeldlinien plötzlich verbinden und Energie freisetzen, die in die Beschleunigung der Jet-Teilchen fließt. Forscher kennen solche magnetischen Kurzschlüsse von der Sonne, wo sie Strahlungsausbrüche auslösen.

Auch Einsteins allgemeine Relativitätstheorie dürfte Auswirkungen auf die Jet-Entstehung haben. Sie sagt voraus, dass der Raum von einem schnell rotierenden Schwarzen Loch mitgerissen wird und wie ein Wasserstrudel im Abfluss eines Waschbeckens um den Zentralkörper herumwirbelt. Diese Rotation des Raumes erfasst alles, auch den Innenbereich der Gasscheibe.

Was also löst die Beschleunigung des Jets aus? Die Rotation des Schwarzen Lochs oder die Rotation der Scheibe? „Diese Frage lässt sich mit Computermodellen nur angehen, indem man die Physik der allgemeinen Relativitätstheorie und der Magnetohydrodynamik gemeinsam löst“, erläutert Silke Britzen. Ein extrem kompliziertes Unterfangen – tatsächlich konnte dieses Problem von der Wissenschaft bis heute nicht gelöst werden.

„Wir würden aber natürlich am liebsten die Region in der unmittelbaren Umgebung des Schwarzen Lochs mit Radioteleskopen direkt beobachten“, sagt die Bonner Forscherin. Vielleicht wird dies einmal mit der *Very Long Baseline Inter-*

Antennen auf dem Feld: Die Station des Low-Frequency Array (LOFAR) in Effelsberg.
Unten sind einige der 96 Dipolantennen für niedrige Frequenzen zu sehen, oben Paneele, die Dipole für höhere Frequenzen verbergen.
LOFAR ist eine Anordnung aus vielen, über Europa verteilten Radioteleskopen, deren Signale zu einem einzigen kombiniert werden.
Die Anlage besteht zurzeit aus 46 Stationen.

» Das „Wackeln“ am Fuß des Gasstrahls könnte seine Ursache darin haben, dass sich zwei Schwarze Löcher in geringem Abstand umkreisen und die Gasscheibe des einen Partners am Boden des Jets zum Schwingen bringen.

terferometry (VLBI) bei kleinen Wellenlängen möglich. Bei dieser Technik beobachtet man einen Himmelskörper gleichzeitig mit mehreren Radioteleskopen weltweit und führt die Daten auf bestimmte Weise zusammen. So erzielt man eine Auflösung, die ein Einzelteleskop mit den Ausmaßen der Erde hätte.

DIE MEISTEN JETS VERLAUFEN NICHT GERADLINIG

VLBI ist eine seit Langem etablierte Technik bei Radiowellenlängen von einigen Millimetern bis Zentimetern. Wenn man sie in den Submillimeterbereich erweitern könnte, würde auch die räumliche Auflösung steigen. Dieses nächste große Projekt, an dem das Bonner Max-Planck-Institut führend beteiligt ist, läuft unter dem Projektnamen *Event Horizon Telescope*.

Seit Kurzem ist Silke Britzen einem weiteren Phänomen auf der Spur, das bedeutender sein könnte als bisher angenommen: doppelte Schwarze Löcher. Wenn zwei Galaxien zusammenstoßen und schließlich miteinander verschmelzen, muss die neu entstehende Galaxie im Zentrum eigentlich zwei Schwarze Löcher besitzen, die sich gegenseitig umkreisen. In einigen wenigen Fällen hat man solche Doppelsysteme tatsächlich nachweisen können. „Wahrscheinlich gibt es viel mehr Paare als vermutet“, sagt Britzen.

Hinweise darauf sieht sie in einigen Jets. „Mittlerweile beobachten wir manche Jets seit Jahrzehnten, sodass wir darin auch Veränderungen feststellen“, sagt die Astrophysikerin. Die meisten Jets verlaufen nicht ganz geradlinig, sondern winden sich wie Schlangen, haben Knicke und Biegungen.

Dies könnte seine Ursache in variierenden Bedingungen bei der Entstehung des Gasstrahls haben: „Da wackelt etwas am Fußpunkt des Jets“, meint Silke

Britzen. Dieses „Wackeln“ könnte seine Ursache darin haben, dass sich zwei Schwarze Löcher in geringem Abstand umkreisen und die Gasscheibe des einen Partners am Boden des Jets zum Schwingen bringen.

Um ihre Beobachtungsdaten mit Modellen erklären zu können, arbeitet Britzen mit Theoretikern zusammen. Kürzlich konnten sie die Jet-Strukturen von zwei Galaxien erklären. In dem einen Fall könnten sich zwei Schwarze Löcher im Abstand von eineinhalb, im anderen von neun Lichtjahren umkreisen. Für zwei – schätzungsweise jeweils eine Milliarde Sonnenmassen schwere – Giganten ist diese Strecke geradezu winzig.

Wegen der enormen Entfernung von einigen Milliarden Lichtjahren wird man die Zentralbereiche dieser beiden Galaxien nicht direkt beobachten können. Aber der leuchtende Fußpunkt der Jets sollte nach dem Modell ebenfalls hin und her wackeln. Nach diesen Schwankungen will Silke Britzen suchen. Dabei setzt sie nicht nur auf immer genauere Radioteleskope, sondern auch auf den kürzlich gestarteten Astrometriesatelliten *Gaia* der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Auf dessen Ergebnisse muss die Bonner Forscherin allerdings noch ein paar Jahre warten. Aber als Astronomin braucht man ohnehin viel Geduld. ▲

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- In Spiralgalaxien entstehen Magnetfelder vermutlich in turbulenten Gasen, wie sie durch die Energie explodierender Sterne erzeugt werden.
- Durch die Rotation der Galaxien erhalten diese lokal chaotischen Felder eine geordnete Struktur, die den Spiralarmen folgt.
- Pulsare sind ideal zur Vermessung der geordneten Magnetfelder unserer Milchstraße.
- Auch im Zentralbereich einer Galaxie, wo sich in wohl fast allen Fällen ein supermassereiches Schwarzes Loch befindet, existieren Magnetfelder. Sie sorgen für die Fütterung des unsichtbaren Zentralkörpers und die Entstehung von Jets.

GLOSSAR

Charles Messier: Der französische Astronom (1730 bis 1817) erarbeitete einen Katalog mit mehr als 100 Himmelsobjekten wie Galaxien, Gasnebeln oder Sternhaufen. Die Nummern aus diesem Messier-Katalog sind noch heute gebräuchlich.

Gaia: Die Raumsonde *Gaia* der Europäischen Weltraumorganisation ESA wurde am 19. Dezember 2013 gestartet. Sie soll den gesamten Himmel im optischen Bereich durchmustern und dabei etwa eine Milliarde Sterne astrometrisch, fotometrisch und spektroskopisch kartografieren.

Ionisation: Prozess, bei dem ein Atom oder Molekül ein Elektron oder mehrere verliert. Zurück bleibt ein positiv geladenes Ion.

Michael Faraday: Der englische Naturforscher (1791 bis 1867) war einer der bedeutendsten Experimentalphysiker des 19. Jahrhunderts. Er entdeckte unter anderem die elektromagnetische Induktion. Farad, die Einheit für die elektrische Kapazität, ist nach ihm benannt.

Polarisation: Licht- oder Radiowellen schwingen in der Regel in allen möglichen Richtungen. Polariert ist eine Welle dann, wenn sie nur in eine bestimmte Richtung schwingt.

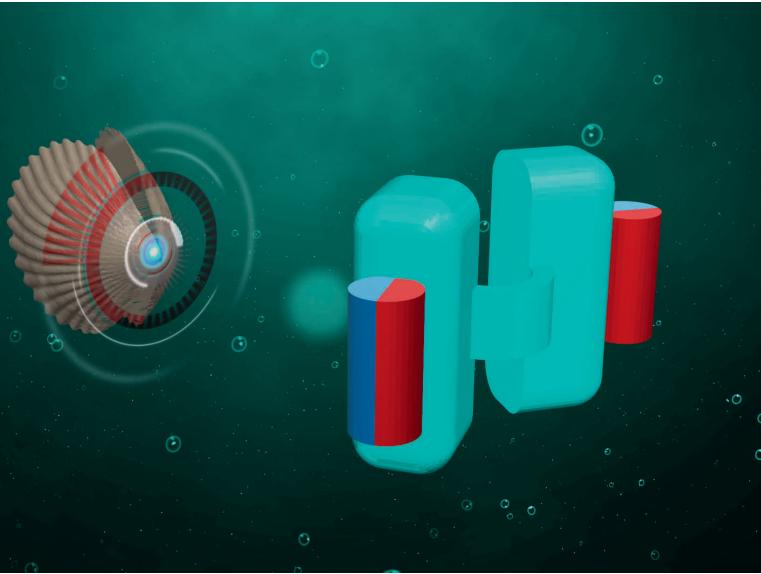
Mikromuschel für die Medizin

Winzige Schwimmer lassen sich durch Medien steuern, die Körperflüssigkeiten ähneln

Mikro- oder gar Nanoroboter könnten im menschlichen Organismus künftig medizinische Dienste verrichten. Diesem Ziel sind Forscher, unter anderem aus der Gruppe von Peer

Fischer am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Stuttgart, nun näher gekommen. Sie haben eine Art künstliche Muschel entwickelt, die nur wenige Hundert Mikrometer groß ist. Diese bewegen die Wissenschaftler durch Flüssigkeiten, indem sie die Muschel mit einem Magnetfeld schnell öffnen und langsam schließen. Möglich ist diese Art der Fortbewegung nur, weil sich die Viskosität der Testflüssigkeiten wie diejenige von Körperflüssigkeiten abhängig von der Geschwindigkeit des Schwimmkörpers ändert. Antrieben ließe sich die Mikromuschel dabei nicht nur durch einen magnetischen Motor, sondern etwa auch durch einen, der auf eine Temperaturveränderung reagiert. Schon zuvor hatten die Stuttgarter Forscher ein Nanovehikel in Form einer Schraube präsentiert, das sich wie ein Propeller durch ein Medium bewegt. (NATURE COMMUNICATIONS, 4. November 2014, & ACS NANO, online veröffentlicht 9. Juni 2014)

Mikroschwimmer in Muschelform: Ein Team um Stuttgarter Max-Planck-Forscher hat nach dem Vorbild der Schalentiere ein winziges U-Boot konstruiert (rechts). Mithilfe kleiner Magnete, die hier als rot-blau Zylinder dargestellt sind, lassen sich die beiden Hälften des Schwimmkörpers öffnen und schließen.



Magnetfelder als Geburtshelfer der Sterne

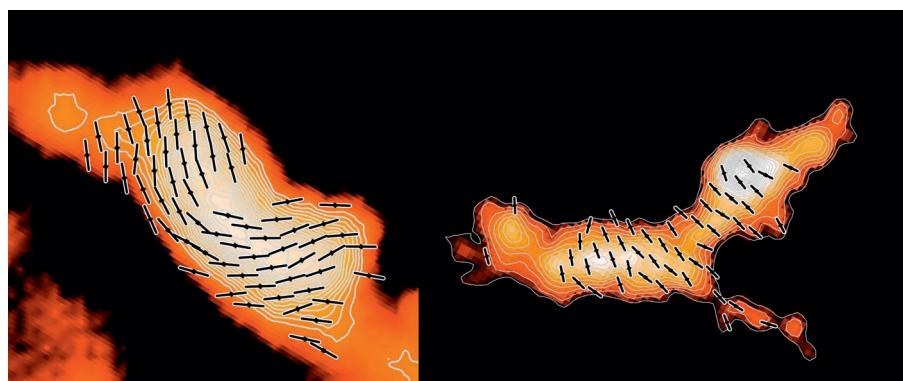
Astronomen beobachten die polarisierte Staubstrahlung von zwei Dunkelwolken in der Milchstraße

Die schweren Sterne im Universum mit mehr als achtfacher Sonnenmasse entstehen aus sehr dichten und massereichen Gaskernen, tief im Innern von interstellaren Wolken. Tatsächlich stellen die hohen Werte für die Masse solcher Kerne die Forscher schon seit Langem vor ein Rätsel: Eigentlich müssten sie aufgrund ihrer eigenen Schwerkraft sehr schnell kollabieren und sich so selbst zerstören – noch ehe sie von irdischen Teleskopen aufgespürt werden können. Was also verhindert den Zusammen-

bruch? Ein Team unter Leitung von Wissenschaftlern des Bonner Max-Planck-Instituts für Radioastronomie hat jetzt die Lösung gefunden: Die Experten beobachteten die polarisierte Staubstrahlung von zwei der massereichsten Dunkelwolken in unserer

Milchstraße, dem „Brick“ (Ziegelstein) und der „Snake“ (Schlange). Dabei fanden sie, dass starke Magnetfelder die Wolken zusammenhalten, stabilisieren und dabei die Geburt von schweren Sternen anschieben.

(ASTROPHYSICAL JOURNAL Vol. 799, 2015)



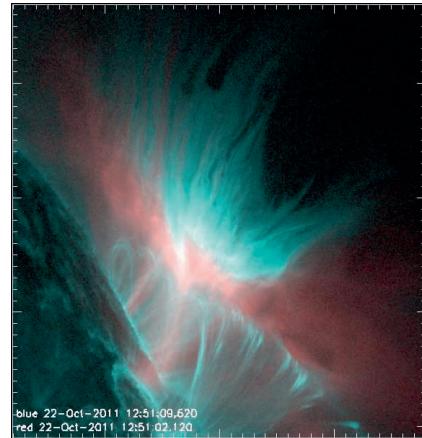
Ziegelstein und Schlange: Das linke Teilbild zeigt den „Brick“; die weißen Konturen verdeutlichen die Strahlung von kaltem Staub. Rechts eine Vergrößerung des dichtesten Teils der „Snake“. Die Pfeile stellen jeweils die Orientierung des aus Polarisationsmessungen abgeleiteten Magnetfelds dar.

Die dunklen Finger der Sonne

Computermodelle erklären bisher rätselhafte Strukturen bei solaren Ausbrüchen

Die Sonne brodelt. In ihrer äußeren Gashülle, der Korona, bilden sich dabei jeweils für einige Minuten fingerförmige Plasmastrukturen. Sie treten immer dann auf, wenn Gasmassen explosionsartig von der Sonnenoberfläche hochgeschleudert werden. Seit ihrer Entdeckung vor rund 15 Jahren rätseln die Forscher, was hinter diesen dunklen, „Kaulquappen“ genannten Strukturen steckt; sie bilden einen deutlichen Kontrast zu dem hellen, im ultravioletten Licht leuchtenden Plasma, in welches sie eingebettet sind. Einem

deutsch-amerikanischen Team unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung ist es nun gelungen, diese filigranen Figuren zu erklären. Die Wissenschaftler analysierten Bilder der Sonne, simulierten das Phänomen aber auch am Computer. Dahinter, so das Ergebnis, steckt ein fundamentaler Prozess der Strömungsphysik, die Rayleigh-Taylor-Instabilität. Sie entsteht etwa beim Aufeinandertreffen verschieden dichter Plasmen. (ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 1. Dezember 2014)



Hexenkessel in der Sonnenatmosphäre: Das Bild stammt vom AIA-Instrument des amerikanischen SDO-Satelliten und zeigt die ultraviolette Strahlung eines Teils der Korona am 22. Oktober 2011. Es wurde bei einer Wellenlänge von 13,1 Nanometern (türkis) und 9,4 Nanometern (rot) aufgenommen. Die dunklen, fingerförmigen Strukturen der Rayleigh-Taylor-Instabilität im oberen Bildteil heben sich vor dem leuchtenden Plasma klar ab.

Kollision der Galaxienhaufen

Unter dem Namen Abell 4067 findet sich in den Himmelskatalogen ein Galaxienhaufen. Neuere Beobachtungen mit dem Satelliten *XMM-Newton* deuten jedoch darauf hin, dass hier in Wahrheit zwei Haufen miteinander verschmelzen. Das kleinere System scheint einen Großteil seines Gases zu verlieren. Bei der Analyse der Daten stellten die Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik außerdem fest, dass der kompakte Kern des eindringenden Haufens diese Begegnung bisher überlebt hat. Wie eine Gewehrkul- gel durchdringt dieser Kern den zentralen Bereich des größeren Galaxienhaufens, ohne dabei zerstört zu werden; die Schichten außerhalb des Kerns werden aber abgestreift. Weitere Beobachtungen sollen demnächst klären, wie das im Detail abläuft und wie sich das Gas aus den beiden Komponenten mischt. Daraus erhoffen sich die Forscher neue Einsichten in das Wachstum von Galaxienhaufen im Allgemeinen. (ASTRONOMY & ASTROPHYSICS, 10. Januar 2015)

Fotos: MPI für evolutionäre Anthropologie / R. Barr (unten), NASA / SDO / MPS (oben)

Bloß kein Außenseiter sein!

Kleinkinder imitieren, um dazugehören – Menschenaffen bleiben sich dagegen treu

Vom Spielplatz bis zum Vorstandsbüro – Menschen passen ihr Verhalten an, um zu einer bestimmten Gruppe dazuzugehören. Bereits Zweijährige beugen sich dem Gruppendruck: Eine Studie von Forschern des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig zeigt, dass Kinder schon in diesem Alter auf eine Belohnung verzichten, wenn sie sich dafür anders verhalten müssten als andere Gleichaltrige. Schimpansen und Orang-Utans ignorieren dagegen selbst als Erwachsene ihre Artgenossen weitestgehend und bleiben sich treu. Die Konformität ist also typisch menschlich und durchaus nützlich, denn sie grenzt verschiedene Gruppen voneinander ab. So hilft das angepasste Verhalten dabei, gemeinsame Aktivitäten zu koordinieren. Darüber hinaus stabilisiert und fördert es die kulturelle Diversität. (PSYCHOLOGICAL SCIENCE, 29. Oktober 2014)

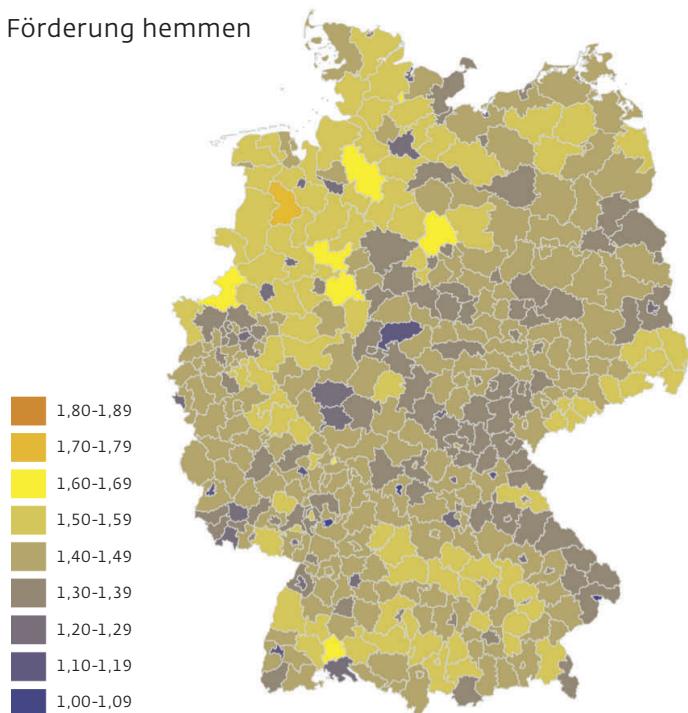


Schon Zweijährige spüren einen Gruppenzwang und passen sich anderen Kindern an.

Mehr Kitas bringen nicht immer mehr Kinder

Stabile, kulturelle Prägungen können familienpolitische Förderung hemmen

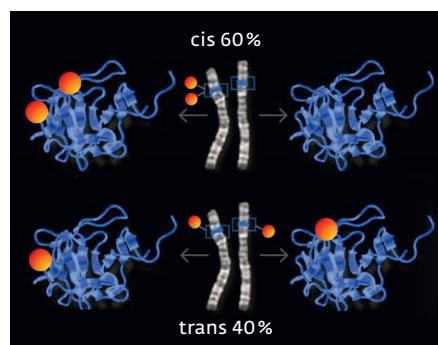
Die Geburtenrate pro Frau liegt in Deutschland bei etwa 1,39 Kindern – im Schnitt. Denn tatsächlich unterscheiden sich Geburtenraten in den Regionen erheblich, und das schon seit Jahrzehnten: Paare entscheiden sich nicht bundesweit einheitlich für oder gegen Kinder; die Schlussfolgerung „Mehr Kitas, mehr Kinder“ oder „Mehr Geld, mehr Kinder“ stimmt nicht überall automatisch. Barbara Fulda vom Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung hat vielmehr regional unterschiedliche Vorstellungen von Geschlechterrollen und Familienleitbildern ausgemacht, die erklären könnten, warum sich sozialpolitische Anreize auf Familiengründung und -erweiterung unterschiedlich auswirken. Diese kulturellen Prägungen traten in einer Feldstudie im Rahmen ihrer Dissertation hervor, in der sie zwei soziostruktuell ähnliche Gegenden in Baden-Württemberg und Bayern miteinander verglich. Sie ergänzten die von der Fertilitätsforschung benannten Faktoren, wie Kindergartenplätze oder ökonomische Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit der Familiengründung. Kulturelle Prägungen wandelten sich aber nur sehr langsam. Das könnte erklären, warum die regionalen Geburtenunterschiede so stabil sind und zur Folge haben, dass familienpolitische Förderung – wie zum Beispiel das Elterngeld für Väter – nicht überall im gewünschten Maße angenommen werde.



Geburtenhäufigkeit in Deutschland nach Regionen für 2011. Die Geburtenraten unterscheiden sich von Region zu Region mitunter drastisch.

Zweisamkeit im menschlichen Erbgut

Unsere Genome sind außerordentlich individuell – eine Herausforderung für die personalisierte Medizin



Jeder Mensch besitzt cis- und trans-Mutationen in einem 60:40-Verhältnis. In der cis-Konfiguration treten zwei oder mehr Mutationen nur in der väterlichen oder der mütterlichen Kopie eines Gens auf. Die Kopie ohne Mutationen dient dann als Bauplan für ein unbeschädigtes Protein. In der trans-Konfiguration sind dagegen beide Genkopien mutiert, sodass beide geschädigte Proteine produzieren.

Der Mensch ist nicht gern allein, und auch seine Gene sind auf Zweisamkeit angelegt. Die heute gängigen Analyseverfahren erfassen allerdings nur ein Mischprodukt aus der mütterlichen und der väterlichen Form eines Gens. Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin haben das Erbgut mehrerer Hundert Menschen analysiert und die Erbinformation auf beiden Chromosomensätzen getrennt voneinander entzückt. Im Durchschnitt gibt es bei einer Stichprobe dieser Größe von jedem Gen rund 250 verschiedene Formen. Bei größeren Stichproben erhöht sich die Zahl der möglichen Formen pro Gen entsprechend. Veränderungen in den Genformen, die dazu führen, dass in einem Protein eine Aminosäure aus-

getauscht wird, heißen Mutationen. Wenn es in einem Gen mehrere Mutationen gibt, sind diese nicht zufällig zwischen den elterlichen Chromosomen verteilt, wie die Forscher feststellten: In 60 Prozent der Fälle treten alle Mutationen eines Gens nur auf einem der beiden elterlichen Chromosomen auf, in 40 Prozent der Fälle auf beiden. Die Vielfalt reduziert sich auf Proteinebene zwar, aber bei 372 Testpersonen bringen die meisten Gene mit ihren zahlreichen Formen immer noch mindestens fünf bis 20 unterschiedliche Proteinformen hervor – eine enorme Herausforderung beim Versuch, individuell maßgeschneiderte Therapien zu entwickeln, die sich gezielt gegen einzelne Proteine richten.

(NATURE COMMUNICATIONS, 26. November 2014)

Erst mal sehen

Visuelle Wahrnehmungen dominieren Gespräche

Wenn sich Menschen unterhalten, sprechen sie zwar auch über das, was sie hören, riechen, schmecken oder fühlen. Aber weitaus häufiger reden sie über visuelle Wahrnehmungen. Sehen ist der wichtigste der fünf Sinne, entsprechende Verben dominieren die Gespräche. Das hat ein Team um Forscher des Max-Planck-Instituts für Psycholinguistik bei einer Studie an 13 Sprachen aus aller Welt herausgefunden. Sie analysierten dazu Ton- und Filmaufnahmen von Alltagsplaudereien. Eine festgelegte Reihenfolge der übrigen Sinneswahrnehmungen im Sprachgebrauch der Menschen fanden die Wissenschaftler jedoch nicht. In den meisten untersuchten Sprachen stand zwar das Hören auf Platz zwei, doch in Semai, einer Sprache der Malaiischen Halbinsel, kamen zum Beispiel verbale Referenzen auf Geruchseindrücke öfter vor als jene, die sich auf Gehörtes beziehen. Warum wir am häufigsten über Gesehenes und das Sehen reden, könnte an der spezifischen Biologie



Alltagsplausch beim Frisieren: Auch hier gilt, dass visuelle Wahrnehmung viel öfter Gegenstand von Gesprächen ist als alles, was mit Hören, Riechen, Schmecken oder Fühlen zu tun hat.

des menschlichen Wahrnehmungsapparates liegen und daran, dass es schlicht mehr Möglichkeiten zu visuellen Erfahrungen gibt als zum Bei-

spiel zu Geschmackserlebnissen – schließlich kann man viel sehen, aber nicht alles probieren.

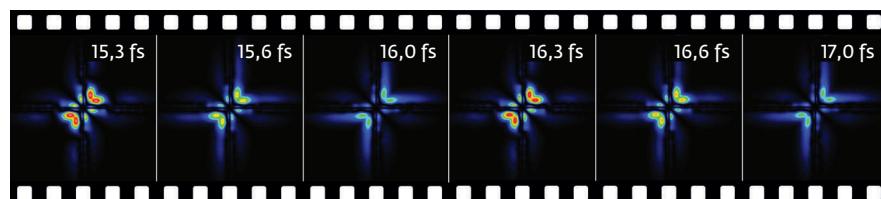
(COGNITIVE LINGUISTICS, 23. Dezember 2014)

Die Choreografie eines Elektronenpaars

Die Bewegung der beiden Teilchen im Heliumatom lässt sich mit zeitlich genau aufeinander abgestimmten Laserblitzen abbilden und steuern

Physiker verfeinern zusehends ihre Kontrolle über die Materie. Ein deutsch-spanisches Team um Forscher des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg hat nun erstmals die Bewegung der beiden Elektronen eines Heliumatoms gefilmt und den elektronischen Paartanz sogar gesteuert. Gelungen ist dies den Wissenschaftlern mit unterschiedlichen Laserblitzen, die sie zeitlich sehr genau aufeinander abstimmten. Dabei verwendeten sie neben sichtbaren Lichtblitzen auch ultraviolette Pulse, die nur einige Hundert

Attosekunden dauerten. Eine Attosekunde entspricht dem milliardstel Teil einer milliardstel Sekunde. Physiker möchten die Bewegung von Elektronenpaaren nicht zuletzt deshalb gezielt beeinflussen, weil sie damit die Chemie revolutionieren wollen: Wenn sie die gepaarten Bindungselektronen in Molekülen mit Laserpulsen verschieben könnten, würden sie möglicherweise Substanzen erzeugen, die sich mit den üblichen chemischen Mitteln nicht herstellen lassen. (NATURE, 18. Dezember 2014)



Elektronischer Paartanz: Heidelberger Physiker haben mit Attosekunden-Pulsen gefilmt, wie sich ein Elektronenpaar in 1,7 Femtosekunden (fs) bewegt (1 fs ist der millionste Teil einer milliardstel Sekunde). Bei 15,3 fs befinden sich beide Elektronen dicht am Kern (Zentrum des Bildes) und entfernen sich dann von ihm. Bei 16,3 Femtosekunden erreichen sie wieder ihre Ausgangsposition.

Vertrauensbildende Maßnahmen

Ein als authentisch empfundenes Lächeln fördert die Bereitschaft zur Zusammenarbeit



Ein Lächeln sagt mehr als tausend Worte: Menschen signalisieren damit Vertrauenswürdigkeit und Kooperationsbereitschaft.

„Mit einem Lächeln gewinnt man mehr Freunde als mit einem langen Gesicht“ – dieses chinesische Sprichwort gilt aber nur, wenn das Lächeln ehrlich und authentisch ist. Dass solch ein Duchenne-Lächeln Vertrauen schafft, haben Forscher am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön mit einem Verhaltensexperiment belegt. Ein Duchenne-Lächeln entsteht unbewusst und gilt als nicht willentlich beeinflussbar. Wie die Studie der Plöner Forscher zeigt, ist der Vertrauensvorschuss häufig gerechtfertigt, denn im Schnitt sind Menschen, die so lächeln, kooperativer. Die Studie zeigt auch, dass eine Person eher authentisch lächelt, wenn viel auf dem Spiel steht und ihr eine Angelegenheit entsprechend wichtig ist. Das Duchenne-Lächeln scheint also Kosten zu haben, die man nur aufbringt, wenn es sich lohnt. (EVOLUTION AND HUMAN BEHAVIOR, Januar 2015)

Übergewicht – wie der Vater so der Sohn

Elterliche Ernährung kann sich über epigenetische Veränderungen auf das Körpergewicht der Kinder auswirken

Das Erbgut bestimmt maßgeblich unser Gewicht. Gleichzeitig wirken aber auch Einflüsse aus der Umwelt über sogenannte epigenetische Veränderungen auf das Körpergewicht. Diese Modifikationen sind vererbbar, obwohl sie den genetischen Code nicht verändern. Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Immunbiologie und Epigenetik in Freiburg haben herausgefunden, dass so die Ernährung von Fruchtfliegen-Männchen das Körpergewicht ihrer Söhne beeinflussen kann. Die Jungtiere, deren Väter zwei Tage vor der Paarung Nahrung mit sehr wenig oder sehr viel Zucker zu sich genommen haben, neigen zu Übergewicht – allerdings nur wenn sie selbst auch viel Zucker essen. Bei einer ausgewogenen Ernährung der Söhne beeinflusst die Nahrung des Vaters das Gewicht nicht. Die Nachkommen, deren Väter nicht durch eine Zuckerdüät oder -orgie konditioniert wurden, bleiben dagegen schlank, auch wenn sie viel Zucker zu sich nehmen. Den Forschern zufolge lockert eine zuckerreiche Ernährung der Väter die Verpackung der DNA in den Söhnen, sodass Fettstoffwechsel-Gene besser

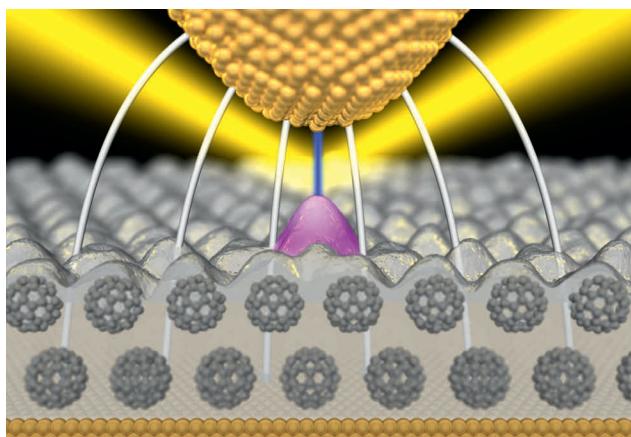
An den roten Augen können die Forscher die übergewichtigen Fliegen erkennen: Durch die besonders zuckerhaltige Ernährung der Väter lassen sich in den Söhnen die Gene für einen roten Farbstoff in den Augen sowie andere Stoffwechselfaktoren ablesen.

abgelesen werden können. Beim Menschen könnte dies ganz ähnlich funktionieren: Eine Auswertung von Untersuchungen an nordamerikanischen Pima-Indianern, die häufig unter Übergewicht leiden, zeigt, dass bei übergewichtigen Menschen dieselben Gene mitmischen wie bei den Fruchtfliegen. (CELL, 4. Dezember 2014)



Nanolampe mit blitzschnellem Schalter

Eine Lichtquelle und ihre transistorgesteuerte Helligkeitsregelung schrumpfen auf die Größe eines einzelnen Moleküls



Information wird in immer kleineren Bauelementen verarbeitet und übertragen, mal mit Elektronen und mal mit Licht. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung in Stuttgart haben nun eine Lichtquelle entwickelt, die einen elektrischen Spannungspuls mithilfe eines einzelnen organischen Farbstoffmoleküls in einen Lichtpuls umwandelt. Dabei trägt das Molekül zum einen zur Erzeugung des Lichts bei und wirkt zum anderen wie ein transistorgesteuerter Lichtschalter. Dieser erlaubt es sogar, die Intensität des Lichts über die angelegte Spannung zu regeln. Da sich das Licht mit dem molekularen Schalter äußerst schnell an- und ausschalten lässt, könnte die Lichtquelle die Blaupause für Nanobaulemente liefern, die elektrische Signale mit Gigahertz-Frequenz in optische Signale umwandeln.

(NANO LETTERS, online veröffentlicht 2. September 2014)

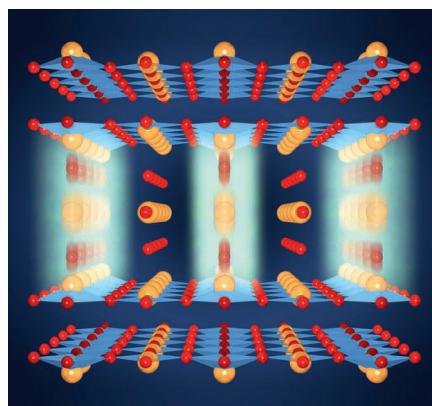
Eine Goldoberfläche beschichten Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung zunächst mit einer Schicht kugeliger Kohlenstoff-Moleküle und platzieren darauf ein einzelnes, hier in Magenta dargestelltes Farbstoffmoleköl. Wenn sie zwischen der so präparierten Oberfläche und der Spitze eines Rastertunnelmikroskops eine Spannung anlegen, entsteht ein elektrisches Feld (graue Linien). Bei einer bestimmten Feldstärke wandelt das Farbstoffmoleköl die elektrische Energie in Licht um, das durch die gelbe Welle angedeutet wird.

Supraleitung ohne Kühlung

Der elektrische Widerstand mancher Materialien lässt sich nicht mehr nur durch extrem tiefe Temperaturen brechen, sondern zumindest für sehr kurze Zeit auch durch intensive infrarote Laserblitze. Wie das Licht eine Kupferoxid-Keramik namens Yttrium-Barium-Kupferoxid schon bei gut 20 Grad Celsius supraleitend macht, erklärt nun ein internationales Team, an dem Physiker des Max-Planck-Instituts für Struktur und Dynamik der Materie in Hamburg maßgeblich beteiligt waren. Demnach verschieben die Laserblitze einzelne Atome des Kristallgitters kurzzeitig und erleichtern so die Bildung des supraleitenden Zustands. Die Erkenntnisse könnten helfen, Materialien zu entwickeln, die ihren elektrischen Widerstand bei

deutlich höheren Temperaturen als die bekannten Supraleiter aufgeben und die dadurch für neue Anwendungen interessant wären.

(NATURE, 4. Dezember 2014)



Widerstandslos bei Raumtemperatur: Kurze Lichtblitze regen Sauerstoffatome (rot) in der Kupferoxid-Keramik kurzzeitig zum Schwingen an, was durch die Unschärfe symbolisiert wird. Dadurch vergrößern sich die Abstände in den Kupferoxid-Doppelschichten (Kupfer – gelborange), während sich die Abstände zwischen den Doppelschichten gleichzeitig verkleinern. Dies verstärkt höchstwahrscheinlich die Supraleitung.

Gehirnjogging am Computer hält nicht, was es verspricht

„Spielend geistig fit.“ Klingt zu schön, um wahr zu sein – und ist möglicherweise auch nicht wahr. Der Werbespruch will uns glauben machen, dass wir mit bestimmten „Gehirnjogging“-Computerspielen unsere geistige Leistungsfähigkeit steigern und sogar Demenzkrankheiten vorbeugen können. Doch diese Behauptungen sind nicht durch Forschungsergebnisse belegt, stellen 70 international anerkannte Kognitionspsychologen und Neurowissenschaftler klar. Es ist nicht hinreichend erforscht, ob und wie diese Spiele auf Gehirn, geistige Leistungsfähigkeit und kompetente Bewältigung des Alltags wirken. Gehirn und Verhalten sind aber auch ohne Computerspiele bis ins hohe Alter trainierbar: Wer körperlich aktiv ist, am sozialen Leben teilnimmt und ein geistig anregendes Leben führt, hat bessere Chancen, geistig gesund zu altern.



Architektin im Zellkosmos

Früher dachte **Elena Conti** daran, Architektin zu werden. Dass sie sich dann doch für ein Chemiestudium entschieden hat, tut ihrer Begeisterung für das Sujet aber keinen Abbruch. Als Direktorin am Martinsrieder **Max-Planck-Institut für Biochemie** studiert sie die Architektur molekularer Maschinen in der Zelle – und staunt über ausgeklügelte Strukturen in kleinsten Dimensionen.

TEXT ELKE MAIER

Schwarzes Ledersofa, Metallmöbel, großformatige Bilder – Elena Conti hat einen Sinn für Ästhetik und klare Linien. Das sieht man schon an ihrem Arbeitszimmer. Links an der Wand klassische Architekturaufnahmen in Schwarz-Weiß: New Yorker Gebäude, als eine Erinnerung an die Stadt, in der sie ihre Postdoc-Zeit verbracht hat. Rechts weiße Leinwände, über die sich Reihen von bunten Punkten schlängeln.

„Das sind künstlerische Darstellungen eines Röntgenbeugungsmusters“, sagt die Wissenschaftlerin, „inspiriert von den Punktgemälden Damien Hirsts.“ Auf dem Tisch noch mehr Kunst: eine leuchtend gelbe Sonne, eine grüne Wiese, ein Apfelbaum. Ein Foto neben dem Computer zeigt die Künstlerin: Elena Contis fünfjährige Tochter Lucia...

Seit 2006 ist Elena Conti Direktorin am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried, seit 2007 außerdem Honorarprofessorin für Chemie und Pharmakologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Am Martinsrieder

Institut leitet die 47-jährige Italienerin die Abteilung „Zelluläre Strukturbioologie“. Gemeinsam mit ihrem Team untersucht sie, wie die molekularen Maschinen aufgebaut sind, die in der Zelle unerwünschte oder fehlerhafte RNA-Moleküle erkennen und unschädlich machen. Auch hier Architektur, nur in atomarem Maßstab.

DIE QUAL DER WAHL VOR DEM STUDIUM

Wenn Elena Conti erzählt, schwingt Begeisterung mit. In ihrem englischen Redefluss macht sich ein südländischer Akzent bemerkbar. Die kleine, zierliche Wissenschaftlerin spricht sehr gern mit den Händen, und sie spricht schnell. „Ich mache alles schnell“, sagt sie und lacht. Manchmal wird sie deswegen sogar von ihrer kleinen Tochter ermahnt: „Caaaaalma, caaaaalma, mamma, sagt sie zu mir!“

Elena Conti stammt aus Varese in der Lombardei. Sie wächst als Einzelkind auf. Ihr Vater arbeitet für ein Che-

mieunternehmen, ihre Mutter bei einem Flugzeughersteller. „Als ich in Italien groß wurde, war es ganz normal, dass Frauen mit Kindern berufstätig waren“, erzählt sie. „Die Großeltern sind eingesprungen – ich denke sehr gern an die Zeit zurück, die ich bei ihnen verbracht habe.“

Dass sie einmal Naturwissenschaftlerin werden wird, darauf deutet erst einmal noch nichts hin. Gegen Ende ihrer Schulzeit, als es um die Studienwahl geht, schwankt sie zwischen Chemie und Architektur, ihren beiden Favoriten. „Ich dachte damals aber, nicht genügend Talent zu haben, um eine gute Architektin zu werden.“ Sie entscheidet sich für Chemie – nicht zuletzt wegen ihres inspirierenden Chemielehrers und mit der Aussicht, eines Tages vielleicht denselben Weg einzuschlagen wie ihr Vater.

Im Jahr 1986 schreibt sich Elena Conti an der Universität Pavia ein. Sie wird vom Collegio Ghislieri gefördert, einer renommierten Institution aus dem 16. Jahrhundert, die besonders be-

Geordnete Strukturen: Elena Contis Interesse gilt dem Aufbau und der Funktion molekularer Maschinen, ohne die eine Zelle nicht überleben kann. Um sie zu erforschen, ist aufwendige Laborarbeit gefragt.



„Das ist der aufregende Teil des Tages“: Ihren täglichen Rundgang durchs Labor möchte Elena Conti nicht missen. Hier stehen sie und ihre Mitarbeiterin Eva Kowalinski (links) am Chromatografiegerät, das der Reinigung von Proteinen dient.

gabte Studierende unterstützt. Eigentlich will sie sich auf organische Chemie spezialisieren, dann aber entdeckt sie, dass sie die Theorie, insbesondere die Molekülstrukturen viel spannender findet als Laborarbeit.

An ihrer Fakultät arbeitet ein junger Professor, der die Struktur von Makromolekülen untersucht. Bei ihm fertigt Elena Conti ihre Diplomarbeit an. Die Idee, in die Wissenschaft zu gehen, nimmt erstmals Gestalt an. Zufälligerweise hatte der Professor, Martino Bolongnesi, seine Ausbildung bei dem Nobelpreisträger Robert Huber in Martinsried erhalten. Damals aber konnte Conti noch nicht ahnen, dass es sie selbst einmal dorthin verschlagen würde.

Zur Doktorarbeit geht Elena Conti ans Imperial College of Science, Technology and Medicine nach London. Hier widmet sie sich dem Enzym, das in lauen Sommernächten für das Blinkkonzert im Garten sorgt. *Die Struktur der Glühwürmchen-Luciferase* lautet der Titel ihrer Arbeit. Mit diesem Thema ist sie ein Exot: „Weil das ein Nischengebiet ohne viel Konkurrenzdruck war, hatte ich ge-

nügend Zeit, um mich gründlich in die Methoden einzuarbeiten“, erinnert sie sich. Ihr Doktorvater, Peter Brick, ist bis heute einer ihrer engsten Vertrauten und Kritiker zugleich: „Meine Arbeitsgruppe liebt es, wenn er auf einer unserer Tagungen auftaucht und mir das Leben schwer macht“, sagt Conti.

WISSENSCHAFT, DIE DEN ADRENALINSPIEGEL HEBT

Als Postdoc an der Rockefeller University in New York eignet sie sich das biochemische Handwerkszeug für ihre weitere Arbeit an. Sie erforscht, wie Proteine vom Zellplasma in den Zellkern transportiert werden. „Die Zeit an dieser Uni hat mir die Augen geöffnet“, erinnert sie sich. „Ich kam aus einer kleinen Arbeitsgruppe, in der es gemütliche Tee pausen gab und wo bei Wimbledonspielen der Fernseher lief, in ein großes geschäftiges Labor, um mich herum lauter aufregende Biologie. Entsprechend hoch war auch der Adrenalinspiegel. Da war es ganz normal, an Weihnachten und Ostern durchzuarbeiten.“

Doch der Aufwand zahlt sich aus: Sie entdeckt, wie ein bestimmtes Erkennungsmotiv, das bei vielen Proteinen im Zellkern vorkommt, von dem entsprechenden Rezeptor registriert wird – ein wichtiges Puzzleteil, um die Transportvorgänge zwischen Zellkern und Zellplasma besser zu verstehen.

Nach diesem Erfolg hat Elena Conti für die Biochemie endgültig Feuer gefangen. Als sie auf eine Stellenausschreibung des European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg stößt, bewirbt sie sich und wechselt 1999 nach Deutschland. Der Abschied fällt ihr nach zweieinhalb Jahren nicht leicht: „New York hat so viel Energie“, schwärmt sie noch immer. „Aber ich wusste, dass das EMBL eine der besten Adressen ist, um meine eigene Arbeitsgruppe aufzubauen.“ Mit einem kleinen Team macht sie sich daran zu erforschen, wie RNA-Moleküle vom Zellkern ins Zellplasma transportiert und dabei nach Fehlern inspiziert werden – ein Thema, das sie bis heute begleitet.

RNAs sind eine Familie von fadenförmigen Makromolekülen, die in der

Zelle lebenswichtige Aufgaben erfüllen. Die sogenannten Boten-RNAs – ein spezieller RNA-Typ – dienen dabei als Kopierer und Kuriere zugleich. Sie sind dafür zuständig, die Bauanleitungen für die Proteine, die in der Erbsubstanz im Zellkern codiert sind, abzuschreiben und an die Ribosomen zu übermitteln. Diese Eiweißfabriken der Zelle fertigen dann anhand der Anleitungen die Proteine.

Bei diesem Prozess ist eine funktionierende Qualitätskontrolle für die Zelle überlebenswichtig, denn bei jedem Schritt können Fehler auftreten. Das Resultat sind defekte RNA-Moleküle – mangelhafte Bauanleitungen, die fatale Folgen für die Zelle und den ganzen Organismus haben können. Ebenso verhängnisvoll wäre es, wenn sich nicht mehr benötigte Anleitungen unkontrolliert in der Zelle anhäufen.

Am EMBL ist Elena Conti nicht die Einzige, die auf diesem Gebiet forscht. Auch Elisa Izaurrealde, heute Direktorin am Tübinger Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie, beschäftigt sich in Heidelberg mit dem RNA-Transport. Die beiden Wissenschaftlerinnen merken, dass sie nicht nur dieselben Forschungsinteressen haben, sondern sich auch in der Methodik vortrefflich ergänzen. „Während Elisa sich die biologische Seite angeschaut hat, habe ich mir die strukturellen Fragen vorgenommen“, erzählt Elena Conti.

Über die Arbeit hinaus freunden sich die beiden an, und so steht zweimal pro Woche ein gemeinsamer Besuch im Fitnessstudio auf dem Programm. „Nach dem Sport haben wir dann in der Sauna über Wissenschaft und Experimente diskutiert“, erinnert sich Conti und lacht. „Die Leute müssen gedacht haben, wir sind verrückt!“

Doch es lohnt sich allemal: Die beiden Forscherinnen charakterisieren eine Reihe von Faktoren, die für den Transport und die Qualitätskontrolle

der RNAs wichtig sind. Im Jahr 2008 werden sie dafür gemeinsam mit dem Leibniz-Preis ausgezeichnet.

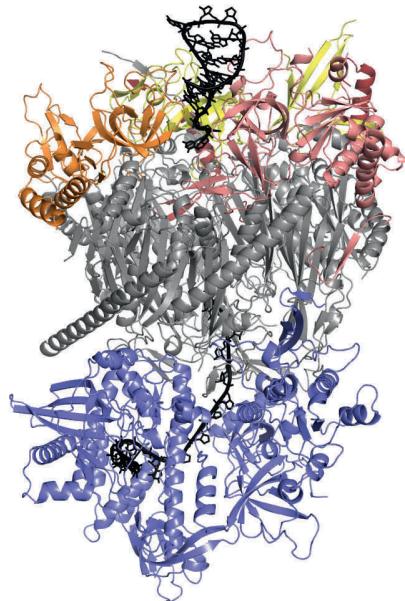
Elena Conti ist bereits zwei Jahre zuvor zur Max-Planck-Gesellschaft gewechselt. Mehr und mehr beschäftigt sie die Frage, was eigentlich passiert, wenn die zelleigene Qualitätssicherung auf fehlerhafte oder überflüssige RNAs stößt: Wie schafft es die Zelle, solche Moleküle loszuwerden? Gemeinsam mit ihrem Team beginnt sie, die ausgeklügelten Maschinen zu erforschen, die – ähnlich einem Aktenvernichter – RNA-Moleküle aufzunehmen und schreddern.

EINE URTÜMLICHE MIKROBE IM FOKUS DER FORSCHER

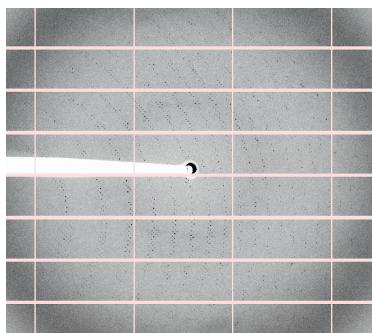
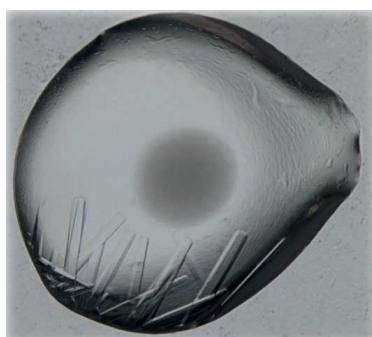
Ein Schwerpunkt ihrer Arbeit ist es, die Funktionsweise des Exosoms zu entschlüsseln – ein Molekülkomplex mit der Aufgabe, RNAs abzubauen. Das Exosom kommt bei allen Eukaryoten vor, also Lebewesen, deren Zellen einen Zellkern besitzen. In einfacherer Form ist es auch bei Prokaryoten (Organismen ohne Zellkern) vorhanden. Zunächst konzentrieren sich Elena Conti und ihre Mitarbeiter auf das Exosom von *Sulfolobus solfataricus*, eines Prokaryoten.

Dieser urtümliche Organismus aus der Gruppe der Archaeen war in den 1980er-Jahren von Wolfram Zillig entdeckt worden, damals Direktor am Max-Planck-Institut für Biochemie. Er fischte die hitzeliebenden Mikroben aus schwefeligen Tümpeln des Vesuvgebiets in der Nähe von Neapel. Im Vergleich zu höheren Organismen besteht ihr Exosom aus weniger Proteinen, und diese sind, als Anpassung an den harschen Lebensraum, besonders robust. Das macht sie für die Forscher einfacher zu handhaben.

Contis Team zeigt, dass das Exosom von *S. solfataricus* eine zylindrische, hohle Struktur bildet. In deren Innern befindet sich das Herzstück der Anlage:



Oben: Hefe-Exosomkomplex in Aktion, dargestellt in atomarer Auflösung: Ein RNA-Molekül (schwarz) wird durch die fassartige Struktur (grau) bis zu derjenigen Untereinheit geschleust, die den Abbau erledigt (violett). Mitte: Um die atomare Struktur von Proteinkomplexen zu untersuchen, züchten die Forscher Kristalle aus gereinigten Proteinen. Die Kristalle enthalten etwa eine Billion regelmäßig angeordneter, identischer Moleküle. Unten: Mittels Röntgenbeugung können die Wissenschaftler die einzelnen Moleküle sehen.





Faible für Design: Elena Contis Sinn für Ästhetik und klare Linien spiegelt sich auch in der Einrichtung ihres Arbeitszimmers. Von ihrem ursprünglichen Gedanken, Architektur zu studieren, ist sie zugunsten von Chemie abgerückt.

die aktiven Zentren, an denen der RNA-Abbau stattfindet. Das Eukaryoten-Exosom ist ganz ähnlich aufgebaut: Auch hier formen neun Protein-Untereinheiten eine fassartige Struktur, allerdings ohne die aktiven Zentren. Für die Schredderarbeit ist stattdessen eine zehnte Untereinheit zuständig, die bei *Sulfolobus* nicht vorkommt.

DURCH DEN SCHLUND DER SCHREDDERMASCHINE

Dieses Ergebnis ist erstaunlich: Warum blieb eine derart komplizierte Struktur im Lauf der Evolution über Milliarden von Jahren – von den Prokaryoten bis hin zu den Eukaryoten – erhalten? Und warum ist sie so wichtig, dass die Zelle ohne sie nicht überleben kann? „An diesem Punkt war klar, dass wir das kompliziertere Eukaryoten-Exosom in Angriff nehmen mussten“, sagt Conti.

Mithilfe aufwendiger biochemischer Methoden ist es den Forschern schließlich gelungen, den Komplex in Aktion darzustellen. „Ist es nicht wunderschön?“, fragt Elena Conti und zeigt am

Bildschirm das dreidimensionale atomare Modell eines Eukaryotenexosoms. Es wurde genau in dem Moment eingefangen, als ein RNA-Molekül angedockt hat und im Begriff ist, im Schlund der Schreddermaschine zu verschwinden.

„Die RNA wird durch den zentralen Hohlraum der Fassstruktur geschleust und landet schließlich bei jener Untereinheit, die den Abbau erledigt“, erklärt die Wissenschaftlerin und dreht das Molekül per Mausklick. „Auch wenn das Fass im Lauf der Evolution seine enzymatische Funktion eingebüßt hat, so sind doch die RNA-Bindestellen und auch der Mechanismus, mit dem die RNA durch den Komplex hindurchgeschleust wird, im Wesentlichen noch immer dieselben.“

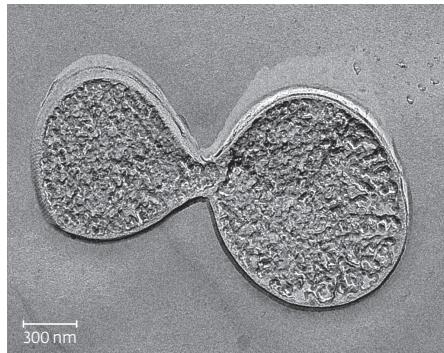
Damit die RNA überhaupt durch den Kanal passt, muss sie zuerst entfaltet werden und eine enge Eingangsöffnung passieren. Was zunächst recht umständlich scheint, entpuppt sich als genialer Schachzug: So landen nur solche RNA-Moleküle im Schredder, die tatsächlich abgebaut werden sollen. Das verhindert, dass eine potenziell ge-

fährliche Maschine wie das Exosom in der Zelle wahllos RNA klein häckselt.

Aber wie erkennt die Zelle überhaupt, welche RNA-Moleküle für den molekularen Müllheimer bestimmt sind? Und wie stellt sie sicher, dass fehlerhafte Moleküle zuverlässig vernichtet werden, bevor sie Schaden anrichten? An diesen Fragen arbeitet die Max-Planck-Forscherin derzeit. Fest steht, dass das Exosom mit vielen anderen molekularen Maschinen in der Zelle kooperieren und kommunizieren muss.

So können etwa Boten-RNAs nur dann abgebaut werden, wenn zuvor andere Maschinen eine charakteristische Struktur am einen Ende des fadenförmigen Moleküls abgeknäpst haben. Conti und ihre Kollegen ergründen, wie der ganze Prozess funktioniert. „Man kann sich das als eine Art Fließband vorstellen“, erklärt die Wissenschaftlerin. „Jede Maschine führt eine ganz bestimmte Aufgabe aus, bevor sie das Werkstück weiterreicht und die nächste in Aktion tritt. Das muss ganz genau koordiniert werden. Wir möchten verstehen, wie der Informationsfluss dabei abläuft.“

» Am wichtigsten sind meine Familie und meine Arbeit. Selbst wenn mein Tag mehr als 24 Stunden hätte, würde ich die Zeit zwischen den beiden aufteilen.



Heiße Quellen wie die Grand Prismatic Spring im Yellowstone-Nationalpark (links) beherbergen hitzeliebende Mikroben aus der Gruppe der Archaeen. Zu diesen ursprünglichen Organismen zählt auch *Sulfolobus solfataricus*. Er wurde in den 1980er-Jahren vom damaligen Max-Planck-Direktor Wolfram Zillig im Vesuvgebiet entdeckt und ist heute ein beliebter Modellorganismus. Rechts ist eine sich teilende *S. solfataricus*-Zelle zu sehen, die Forscher mittels Gefrierätzung dargestellt haben.

Dass Fehlfunktionen im RNA-Stoffwechsel auch bei vielen Krankheiten eine Rolle spielen, lässt erahnen, wie wichtig diese Prozesse sind. So erhielt die Wissenschaftlerin im Jahr 2014 für ihre Arbeit den Louis-Jeantet-Preis für Medizin, eine der renommiertesten Auszeichnungen in der biomedizinischen Forschung.

An der Laborbank steht Elena Conti mittlerweile nicht mehr selbst. Umso mehr freut sie sich auf ihren täglichen Rundgang durchs Labor, um mit ihren Mitarbeitern zu sprechen und zu sehen, was geklappt hat und was nicht. „Das ist der aufregende Teil des Tages“, sagt sie. „Ich habe großartige Leute im Labor! Wenn ich ein Experiment vorschlage, stelle ich meistens fest, dass sie schon längst daran gedacht haben und damit halb fertig sind.“

Ob sie bei so viel Enthusiasmus überhaupt an etwas anderes denkt, wenn sie abends das Institut verlässt? „Es ist schwierig abzuschalten“, gibt sie zu. Wie Maria Callas in einem berühmten Zitat sagt: „Eine Oper fängt bereits an, bevor der Vorhang aufgeht, und endet erst, wenn er schon lange wieder geschlossen ist!“ In diesem Satz steckt besonders viel Wahres, wenn, wie in Elena Contis Fall,

der eigene Partner ebenfalls Wissenschaftler ist: Jürg Müller leitet am Martinsrieder Max-Planck-Institut eine Arbeitsgruppe, die sich mit Chromatin – dem Material der Chromosomen – und dem Ablesen der Gene befasst.

FAMILIENALLTAG MIT GENEN UND MOLEKÜLEN

Da bleibt es nicht aus, dass Gene, RNAs und Molekülkomplexe oft auch zu Hause präsent sind. „Das ist für das Familienleben schon eine Herausforderung“, sagt Elena Conti. Doch gerade die kritische Meinung ihres Partners ist ihr sehr wichtig: „Wenn man älter wird, werden die Mitarbeiter immer jünger und trauen sich manchmal nicht, einem offen zu sagen, was sie denken“, glaubt sie.

Elena Conti und Jürg Müller haben sich am EMBL in Heidelberg kennengelernt. Als die gemeinsame Tochter ein halbes Jahr alt ist, zieht er ebenfalls nach München. Im ersten Lebensjahr hilft eine Tagesmutter bei der Kinderbetreuung, seitdem geht Lucia in den Institukturkergarten. Wenn Elena Conti und Jürg Müller zur gleichen Zeit unterschiedliche Konferenzen besuchen, springen die Großeltern gern ein und

nehmen Lucia zu sich. „Ich wünsche mir, dass meine Tochter zu ihren Großeltern eine genauso enge Bindung hat wie ich damals zu meinen“, sagt Conti.

Wo sie ihre Prioritäten setzt, das weiß die Wissenschaftlerin ganz genau: „Am wichtigsten sind meine Familie und meine Arbeit. Selbst wenn mein Tag mehr als 24 Stunden hätte, würde ich die Zeit zwischen den beiden aufteilen.“ Elena Conti und ihre Familie leben im Münchener Westen. Für den Botanischen Garten, den Tierpark Hellabrunn und die Städtische Galerie im Lenbachhaus haben sie Jahreskarten, oft trifft man die drei hier am Wochenende. Dass Conti gleich auch ein kleines Schokoladengeschäft hinter dem Viktualienmarkt einfällt („Da müssen Sie unbedingt hin!“), zeigt, dass ihr nicht allein der Kunstgenuss wichtig ist.

Ansonsten bleibt für Freizeitaktivitäten nicht viel Zeit, und ins Fitnessstudio schafft sie es auch nur noch einmal die Woche. „Meine Arbeit ist mein Hobby“, sagt sie – fast so, als müsse sie sich dafür entschuldigen. Dabei ist es doch ein Privileg, wenn Arbeit zugleich Leidenschaft ist. Oder, wie in Elena Contis Fall, gleich zwei Leidenschaften: Architektur und Chemie. ▶

Impfung aus dem Reaktor

Wenn eine weltumspannende Pandemie durch Grippeviren droht, könnte die Impfstoffproduktion an ihre Grenzen kommen. Denn der Grippe-Impfstoff wird heute größtenteils noch in bebrüteten Hühnereiern erzeugt. **Udo Reichl**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme**, und seine Mitarbeiter erforschen daher eine vollautomatische Produktion in Zellkulturen, die im Krisenfall Impfstoff in großer Menge liefern soll.

TEXT TIM SCHRÖDER

Zu den Waffen gegen die Grippe gehört das Ei, das ganz gewöhnliche Hühnerei. Denn so ein Ei ist ein Biotechnologie-Labor im Kleinen. 1931 machte der Pathologe Ernest W. Goodpasture von der Vanderbilt University in Nashville eine folgenreiche Entdeckung. Er pikste ein bebrütetes Ei mit einer feinen Nadel an und infizierte es mit Grippeviren. Im Ei vermehrten sich die Viren prächtig. Als Goodpasture nach einigen Tagen ein wenig Flüssigkeit aus dem Ei absaugte und sie untersuchte, war die Anzahl der Viren in die Höhe geschossen. Goodpasture war sofort klar: Eier sind geradezu ideal für die Vermehrung von Grippeviren – und das perfekte Werkzeug für die Herstellung von Impfstoffen. Denn für Impfungen braucht man Viren.

Der Trick besteht darin, den Körper behutsam mit Viren anzuimpfen, ohne ihn krank zu machen. So lernt das Immunsystem den Krankheitserreger kennen und kann eine Abwehr gegen ihn entwickeln. Zu diesem Zweck nutzt die Medizin drei verbreitete Impfmethoden. Bei der ersten spritzt man eine große Zahl abgetöteter Viren, bei der zwei-

ten eine geringere Zahl von Viren, die abgeschwächt und nicht mehr infektiös sind. Bei der dritten Methode verabreicht man nur Bruchstücke der Virenhülle oder einzelne Virenproteine. In jedem Falle aber sind Viren nötig.

HERSTELLUNG VON IMPFSTOFFEN SOLL EFFIZIENTER WERDEN

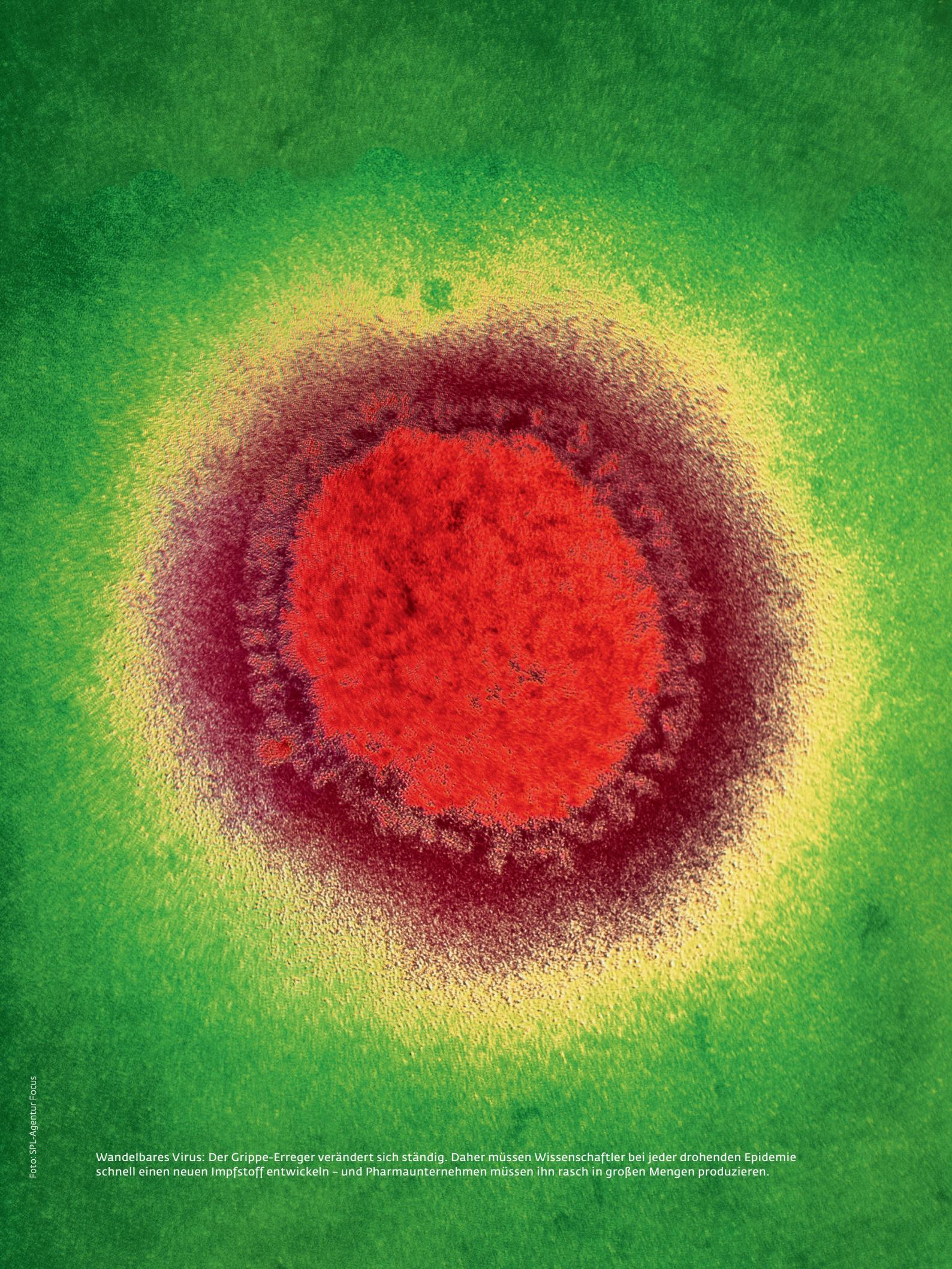
Goodpastures Methode ist inzwischen 80 Jahre alt und wurde immer weiter verfeinert. Zur Herstellung von Influenza-Impfstoffen jedoch wird das Ei noch immer genutzt. 95 Prozent aller Grippe-Impfdosen enthalten auch heute noch Viren, die in Eiern vermehrt wurden. Doch inzwischen stößt das Verfahren an seine Grenzen. Denn für eine einzige Impfdosis benötigt man ein oder zwei Eier, die im Brutkasten bebrütet wurden. Um ausreichend Impfstoff für ein ganzes Land herzustellen, sind folglich mehrere Millionen Eier nötig.

Für die Europäische Union konnte auf diese Weise bislang noch ein ausreichend großer Vorrat an Impfstoffen für die nächste Grippewelle angelegt werden. „Aber was ist, wenn in China oder Indien, Ländern mit zusammen mehr

als zwei Milliarden Menschen, eine Epidemie ausbricht? Dann kommt man mit der Produktion nicht mehr hinterher“, sagt Udo Reichl, Direktor der Abteilung „Bioprozesstechnik“ am Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme in Magdeburg.

Der Biologe und Verfahrenstechniker arbeitet mit seinem Team daran, Alternativen zur Impfstoffproduktion im Ei zu entwickeln. Wie Impfstoffhersteller und andere Forschungsgruppen weltweit setzt er dabei auf tierische Zellen, die er in Laborgläsern und Bioreaktoren kultiviert. Doch ein etabliertes Verfahren in der pharmazeutischen Produktion zu ersetzen ist teuer. Entsprechend zurückhaltend ist die Industrie damit. Deshalb möchte Udo Reichl die Herstellung von Impfstoffen in Zellkulturen so effizient machen, dass Unternehmen darin eine lohnende Alternative sehen.

Die Zellen, die für die Virenproduktion infrage kommen, wurden meistens schon vor vielen Jahren oder gar Jahrzehnten aus verschiedenen Lebewesen und Organen extrahiert – aus Affen, Hamstern oder Hunden zum Beispiel. Viele dieser Zelllinien sind unsterblich,



Wandelbares Virus: Der Grippe-Erreger verändert sich ständig. Daher müssen Wissenschaftler bei jeder drohenden Epidemie schnell einen neuen Impfstoff entwickeln – und Pharmaunternehmen müssen ihn rasch in großen Mengen produzieren.

sie können sich unendlich teilen. Daneben gibt es neue Zelllinien, die in Forschungseinrichtungen oder von Biotech-Firmen genetisch unsterblich gemacht wurden und sich so ebenfalls für die Herstellung von Arzneimitteln eignen.

Das Team um Udo Reichl hat sich für seine Forschungsarbeiten mehrere solcher Zelllinien ausgesucht, in denen sich Viren besonders gut vermehren. „Das ist schon lustig“, sagt Reichl, „andere Wissenschaftler sind damit beschäftigt, Viren zu bekämpfen und ihre Zahl möglichst gering zu halten. Wir aber wollen eine Zelle dazu bringen, so viele Viren wie möglich zu produzieren. Wir arbeiten nicht anti-, sondern proviral.“

Es ist faszinierend und erschreckend zugleich, wie ein Virus eine Zelle infiziert und dazu bringt, Tausende Virenkopien freizusetzen. Ein Grippevirus etwa gleicht einer stachlichen Kugel. Bei diesen Stacheln handelt es sich um die Eiweiße Hämagglutinin und Neuraminidase. An der Spitze des Hämagglutinins sitzt eine Art Schlossstruktur, mit

der das Virus gezielt an die Oberfläche von tierischen oder menschlichen Zellen andocken kann. Es hängt vor allem von der Feinstruktur dieser Bindestelle ab, ob die Strukturen auf der Zelloberfläche wie ein Schlüssel ins Schloss zum Viren-Hämagglutinin passen – und ob ein Virus so Zugang zu einer Zelle erhält.

KAMPF GEGEN DIE GRIPPE ALS WETTLAUF GEGEN DIE ZEIT

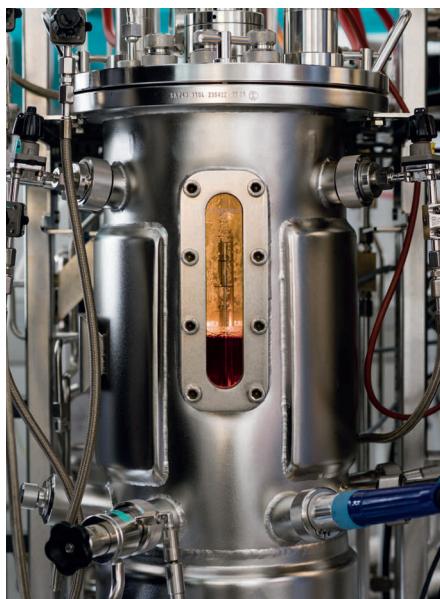
Findet das Schloss auf der Virenoberfläche einen Schlüssel auf der Zelloberfläche, nimmt das Unheil seinen Lauf. Die Membran der Wirtszelle öffnet sich, das Virus dringt in die Zelle ein und entlässt seine Erbgutstränge ins Zellinnere. Das Virus programmiert die Zelle um: Sie wird zur Virenproduktionsstätte. Sie synthetisiert brav Virenbestandteile, die anschließend zu Hunderten oder Tausenden neuer Viren zusammengesetzt werden und sich von der Zelloberfläche abschnüren. Für diese Abschnürung ist das Vireneiweiß Neuraminidase

wichtig. Für Mensch und Tier ist es fatal, wenn sich die Viren so prächtig vermehren – dann bricht die Krankheit erst richtig aus. Für die Impfstoffproduktion aber ist das ideal.

Während Grippeviren heute noch zum größten Teil im Ei produziert werden, züchtet man andere Virenarten schon lange in Zellkulturen. Doch das Ziel der Impfstoffentwickler ist in beiden Fällen das gleiche: in kurzer Zeit große Mengen von Viren herzustellen, um im Falle einer Epidemie oder gar weltumspannenden Pandemie ausreichend Impfstoff verfügbar zu machen. Fatalerweise lassen sich viele Impfstoffe nicht auf Vorrat produzieren. Denn Viren, vor allem Grippeviren, sind höchst wandlungsfähig. So entstehen ständig neue Erreger, gegen die der vorhandene Impfstoff nicht hilft.

Der Kampf gegen die Grippeviren ist deshalb ein Wettkauf gegen die Zeit. Gelingt es den Wissenschaftlern, eine neue Virenvariante aufzuspüren und die Impfstoffe an sie anzupassen, ehe sich

Effektive Impfstoffproduktion: Im Bioreaktor (links) werden Zellen in einem Nährmedium gezüchtet. Die Zellkulturen werden anschließend mit Viren infiziert, die sich vermehren und als Basis eines Impfstoffs dienen. Um eine möglichst hohe Dichte an Wirtszellen zu erhalten, variieren Forscher am Magdeburger Max-Planck-Institut zahlreiche Faktoren. Mithilfe der Hochzelldichte-Kultivierung (rechts) wollen Daniel Vazquez Ramirez und seine Kollegen bis zu 100-mal mehr Zellen anreichern als mit herkömmlichen Methoden.





Proviale Forschung: Udo Reichl ist Biologe und Verfahrenstechniker am Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme. Zusammen mit dem Team der technischen Biologin Yvonne Genzel entwickelt er neue Techniken der Impfstoffproduktion, um möglichst effizient Viren zu erzeugen.

der Erreger zu einer großen Grippewelle auswächst? Häufig gewinnen Pharmahersteller und Forscher das Rennen. Oft aber sind die Viren schneller. Dann wird es heikel, denn dann breitet sich das Virus schnell zur Pandemie aus. Dann wäre es gut, eine vollautomatische Grippeviren-Zuchtmaschine zu haben, die sich schnell hochfahren lässt und die Viren in großer Zahl ausstößt – eine Produktionslinie, wie Reichl sie entwickeln will.

Die grundlegende Technik für eine solche Virenzucht im großen Maßstab gibt es bereits. Dabei handelt es sich um Bioreaktoren, eine Art von Zuchtkessel. Doch noch gibt es auf dem Weg zur optimalen Virenzucht Hürden. Die erste besteht darin, dass sich die Zellen für die Virenzucht – wie die Zellen im bebrüteten Hühnerei – stark vermehren müssen. Anschließend werden die Zellen gewaschen, mit frischem Nährmedium versorgt und mit Viren infiziert, um auf Virenproduktion umzuschalten.

Derzeit gibt es mehrere Zellzuchtverfahren. So gibt es Zellen, die nur dann wachsen und sich teilen, wenn sie sich an Oberflächen anheften können, sogenannte adhärente Zellen. Bei ihnen ist die Höchstmenge stark beschränkt, weil die verfügbare Oberfläche irgendwann zugewachsen ist und die Zellteilung stoppt. Im Gegensatz dazu fühlen sich manche Zellen nur frei schwebend in einer Nährlösung, einer Zellsuspension, wohl. In einer solchen Suspension lassen sich viel höhere Zellkonzentrationen erreichen als bei adhärenten Zellen. Doch in Suspensionen haben die Zellen zum Teil die Tendenz, mit anderen zu verklumpen, was den Prozess beeinträchtigen kann. Zudem ist die Filtration, die Abtrennung der Zellen aus dem Medium, aufwendig. Für Bioreaktoren wurde deshalb eine dritte Methode, ein Mittelweg, entwickelt: eine Art Pseudosuspension für adhärente Zellen. Dabei lässt man adhärente Zellen auf

Mikrokügelchen wachsen. Die Mikrokügelchen wiederum schwimmen frei in der Flüssigkeit.

„Alles in allem erhält man mit diesen Methoden heute im Durchschnitt Konzentrationen von etwa zwei bis drei Millionen Zellen pro Milliliter Flüssigkeit. Für eine Zuchtanlage, wie sie uns vorschwebt, wollen wir zehn- bis hundertmal so viel erreichen. Wir nennen das Hochzelldichte-Kultivierung“, sagt Yvonne Genzel, technische Biologin in der Abteilung von Udo Reichl. Das ist ein ehrgeiziges Ziel, doch die Forscher können an vielen Schrauben drehen. Da Zellen empfindlich sind, braucht jede Zelle zum Beispiel das richtige Nährmedium mit der idealen Nährstoffzusammensetzung, mit Mineralien, Vitaminen, Zuckern. Die Temperatur muss ebenso exakt eingestellt sein wie der pH-Wert und der Sauerstoffgehalt des Mediums. Ein Röhreinsatz ist notwendig, der die Zellen oder Mikrokügelchen umein-



Es geht um Quantität und Qualität: Doktorand Sascha Kupke zählt anhand der Färbung eines viralen Proteins, wie viele Zellen mit Viren infiziert wurden. Den Infektionsstatus und den Zustand der Zellen untersucht die Doktorandin Mandy Bachmann mithilfe eines Laser-Scanning-Mikroskops.

anderwirbelt, damit sie nicht verklumpen und damit die Nährstoffe und der Sauerstoff gleichmäßig verteilt werden.

HOHLFASERN SOLLEN AUSBEUTE WEITER STEIGERN

Kaum eine Forschungsgruppe auf der Welt hat die Möglichkeit, so viele Faktoren, die bei der Züchtung von Viren und Zellen mitmischen, zu beeinflussen wie die Magdeburger Biotechnologen: angefangen bei der Form des Reaktors für die Zellkulturen bis hin zur nachträglichen Veränderung eines Impfstoffs. So kann Reichls Team den Prozess in seiner ganzen Komplexität untersuchen und die Auswirkung jeder Veränderung umfassend analysieren, um das Verfahren ganz gezielt zu steuern und zu optimieren.

In den Magdeburger Labors stehen etliche Glasreaktoren, in denen sich kleine Propeller drehen. „Diese Rührer müssen die richtige Form und das richtige Tempo haben, damit wir die Zellen nicht zerschlagen“, sagt Yvonne Genzel. Sie klappt die Stahltür eines Brutschranks

auf. Darin wackelt ein Rütteltisch, auf dem kleine Glaskolben festgeklemmt sind, in denen Zellen schwimmen. Sie nimmt einen der Kolben heraus und hält ihn gegen das Licht. Die Lösung ist bräunlich-trüb. „Eine recht hohe Zellkonzentration“, stellt Genzel fest.

Für eine Hochzelldichte-Kultivierung muss das Nährmedium zunächst alle paar Tage und dann immer häufiger ausgetauscht werden, damit die Zellen ausreichend Nährstoffe erhalten. Nur dann teilen sie sich häufig, und die Zelllösung wird stark konzentriert. Nun wird der Sauerstoffeintrag zum limitierenden Faktor. Denn je mehr Zellen in der Lösung schwimmen, desto mehr Sauerstoff verbrauchen sie. Daher pumpen die Forscher reinen Sauerstoff in die Gefäße, um die vielen Zellen versorgen zu können. Doch auch das hat irgendwann eine Grenze, weil der Rührer sich nicht beliebig schnell drehen kann, um den Sauerstoff in der hochkonzentrierten Zellkultur gleichmäßig zu verteilen. Dennoch haben Reichl, Genzel und die Kollegen schon beachtliche Zellzahlkonzentrationen erreicht:

Für die Grippevirenzucht sind es bereits 50 Millionen Zellen pro Milliliter. Künftig wollen sie aber sogar 500 Millionen schaffen.

Um die Zelldichte weiter zu steigern, könnte eine recht junge, vielversprechende Technik für Zuchtanlagen helfen. Yvonne Genzel greift zu einem Glasrohr. Darin liegt ein daumendickes Bündel aus dünnen, weißen Hohlfasern aus Kunststoff. Dieser ist zwar durchlässig für Sauerstoff und Nährstoffe, nicht aber für Viren und Zellen. Mit dem Kunststofffaserbündel lassen sich Zellen im Durchfluss züchten. Dabei werden die Räume zwischen den feinen Hohlfasern mit Zellen gefüllt und dann die Nährmedien durch die Fasern gepumpt.

Wie bei Arterien im Körper wandern die Nährstoffe und der Sauerstoff durch die Faserwände zu den Zellen. „Wir erreichen so eine bessere Verteilung der Nährstoffe und ein stärkeres Zellwachstum als in konventionellen Bioreaktoren“, sagt Genzel. Ein Vorteil ist, dass bei den Röhren das verbrauchte Nährmedium nicht mehr mühsam von den Zellen getrennt und ausgetauscht wer-

den muss. Man leitet einfach frisches Nährmedium durch die Röhre.

Bis zur perfekten Virenzucht aber ist der Weg noch weit, denn die Zahl der Zellen, die die Viren erbrüten, ist nicht alles. Wichtig ist auch, dass die Zellen in den Hochzelldichte-Kulturen in einem guten Zustand sind, denn nur dann können sie auch viele Viren produzieren. Entscheidend für eine hohe Virenausbeute ist nämlich neben der Zellzahl auch die Menge der Viren, die jede Zelle hervorbringt. Diese schwankt zwischen einigen Hundert und mehreren Zehntausend Viren pro Zelle.

Dabei spielt es eine große Rolle, den richtigen Zeitpunkt zu finden, um die Zellen in der Zellkultur mit den Viren zu infizieren: Zum einen sollte die Zellzahl möglichst hoch, und zum anderen müssen die Zellen fit sein. „Es gehört viel Erfahrung dazu, optimale Bedingungen dafür zu finden“, sagt Genzel. Stimmt alles, impfen die Forscher die Zellen mit sogenannten Saatviren an. Auch die Saatviren sollten in einem guten Zustand und hoch infektiös sein, damit, sozusagen, jeder Keim aufgeht.

Nach sechs bis acht Stunden setzen die infizierten Zellen die ersten Viren frei, die wiederum neue Zellen infizieren. Während die Zellen langsam sterben, reichern sich im Zellmedium Milliarden frischer Viren an. Diese werden schließlich in einem Filterprozess aus dem Nährmedium gefischt. Auch der Zeitpunkt der Virenernte ist wichtig, um eine hohe Ausbeute an Viren zu erreichen. Das gilt vor allem für Impfstoffe, bei denen lebende Viren verabreicht werden. Denn je länger man mit der Ernte der Viren wartet, desto mehr inaktive, nicht infektiöse Viren sammeln sich im Reaktor. Die Kunst besteht darin, für die Ernte den Zeitpunkt zu finden, zu dem sich im Reaktor die meisten infektiösen Viren befinden. Für Impfstoffe, die auf toten Viren basieren, ist das Verfahren weniger zeitkritisch, weil die Viren hier nicht aktiv sein müssen.

Die Virenzucht in Magdeburg ist nicht nur Verfahrenstechnik. „Wir wol-

len auch in die Zellen hineinblicken und versuchen, sie so zu verändern, dass sie noch mehr Viren produzieren“, sagt Reichl. Um das tun zu können, hat er einen ganzen Park an Analysegeräten angeschafft – eine sogenannte HPLC zum Beispiel, eine Hochleistungsflüssigkeitschromatografie-Anlage, mit der die Stoffwechselprodukte der Zellen während der Vireninfektion und -produktion gemessen werden können.

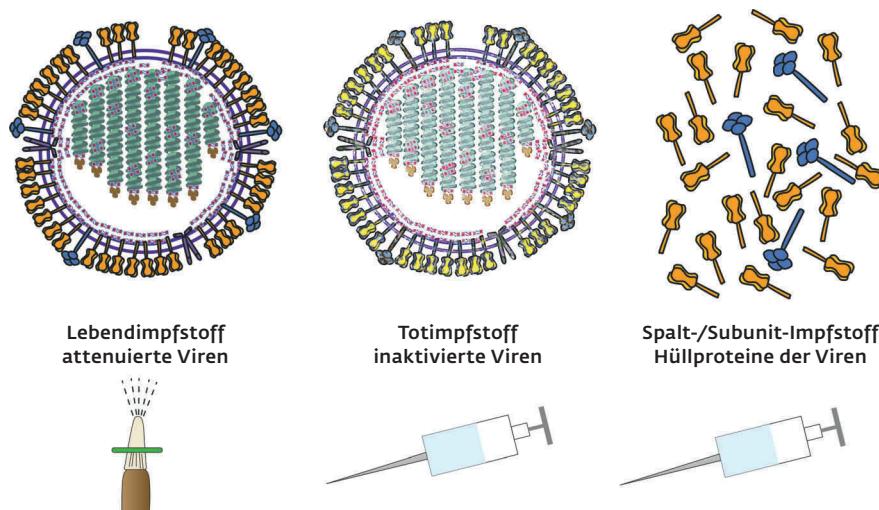
GÄNGIGE VERFAHREN SIND MEIST WIE IN STEIN GEMEISSELT

„Ich hatte erwartet, dass die Zellen ihren Stoffwechsel hochfahren, wenn sie Viren produzieren“, sagt Reichl. „Doch sie verhalten sich wie gesunde Zellen. Es verändert sich nach einer Infektion der Zellen nicht viel – bis der Großteil der Viren freigesetzt ist und die Zelle stirbt.“ Reichl kann noch mehr, als Stoffwechselprodukte der Zellen zu untersuchen. Mit dem Durchflusszytometer etwa lassen sich Zellen zählen und analysieren. In einem Zytometer saust Zelle für Zelle durch ein winziges Glasrörchen.

Mehrere Zehntausend Zellen erfasst das Gerät in einer Sekunde. Mehr noch: Im Zytometer können die Zellen durch Laserlicht angestrahlt werden. Damit lässt sich zum Beispiel messen, welches Vireneiweiß gerade in der Zelle hergestellt wird oder ob sich die Eiweiße gerade im Zellplasma oder im Zellkern befinden.

Noch ist zum Teil unklar, wie Reichl und Genzel dieses Wissen nutzen können, um die Virenproduktion in den Zellen zu verbessern. Eines aber ist sicher: „So genau wie wir schaut sich kaum jemand anders die Vorgänge an, die in der Impfstoffherstellung zur Vermehrung der Viren in Zellkulturen von entscheidender Bedeutung sind“, sagt Genzel. Dies betrifft auch die Impfstoffhersteller. „Diese Grundlagenforschung können die Unternehmen in der Regel gar nicht leisten. Außerdem tasten nur die wenigsten Unternehmen die etablierten Virenzuchtprozesse an, weil es sehr teuer ist, Herstellungsprozesse zu verändern und Verfahren zu optimieren.“

Reichl ergänzt: „Bedingt durch sehr hohe Auflagen der Behörden sind solche Verfahren meist wie in Stein gemeißelt,



Vorbereitung für den Ernstfall: Um das Immunsystem für eine Infektion durch Viren zu trainieren, haben sich drei Impfmethoden etabliert. In Variante eins werden lebende, abgeschwächte Viren etwa als Nasenspray verabreicht (links). Dafür werden die Viren so gezüchtet, dass sie zwar noch vermehren, aber keine Erkrankung mehr auslösen können. Bei der zweiten Methode werden abgetötete Viren gespritzt. In einer dritten Variante hingegen werden nur Bruchstücke von der Hülle oder Proteine der Viren injiziert.



viele Hersteller nutzen sogar noch die klassischen adhärenten Zellen für die Virusvermehrung – also jene Zellen, die eine feste Oberfläche benötigen.“ Bedenkt man, dass die Entwicklung eines neuen Impfstoff-Produktionsverfahrens mehrere Hundert Millionen Euro kostet, wird allerdings klar, warum die Branche vergleichsweise konservativ ist.

DER MARKT FÜR IMPFSTOFFE IST ENORM GEWACHSEN

Genzel und Reichl arbeiten nicht nur mit Grippeviren, sondern unter anderem auch mit einem lange etablierten Virustyp, der vom Pockenvirus abstammt – dem Modifizierten Vaccinia-Ankara-Virus (MVA). Dieses Virus wurde durch jahrelange Adaptation von einem der Pioniere der Immunitätsforschung, dem Münchener Veterinärmediziner Anton Mayr, erzeugt. Dieses Impfvirus ist sehr gut verträglich und nicht infektiös und eignet sich damit sehr gut für die Arbeit in einfachen Labors. Wollte ein Forscher hingegen mit Ebolaviren arbeiten, müsste er hohe Sicherheitsstandards erfüllen – mitsamt Luftschieleusen, Unterdrucksystemen und Filteranlagen.

MVA ist vor allem deshalb interessant, weil es sich als Transporter für Gene eignet. Solche Transportviren werden als Vektoren bezeichnet – und unter anderem in der Medizin eingesetzt; beispielsweise bei Krankheiten, die auf Gendefekten beruhen. So gibt es Betroffene, bei denen ein Gen defekt ist, das die Information für den Bau eines für den Stoffwechsel wichtigen Eiweißes enthält. Mit einem Vektor kann man das fehlende Gen in den Körper einschleusen, sodass der Körper auf diesem Umweg die Information für den Bau des Eiweißes enthält.

Ein neuer Weg, Zellen zu züchten: Um die Impfstoffproduktion zu optimieren, experimentieren Udo Reichl und Yvonne Genzel mit einem Bioreaktor, in dem sich Bündel hohler Fasern befinden. Die Wirtszellen besiedeln den Raum zwischen den durchlässigen Fasern, durch die das Nährmedium gepumpt wird.

Darüber hinaus können solche Vektoren genutzt werden, um den Körper gegen gefährliche Krankheiten zu impfen. Forscher hoffen, dass dies auch bei Ebola oder HIV/Aids klappen wird. Für eine Impfung wird MVA mit den Oberflächeneiweißen eines gefährlichen Virus verkleidet, beispielsweise eines Aids-virus. Da MVA harmlos ist, passiert dem Patienten nichts. Das Immunsystem aber lernt auf diese sanfte Weise die Oberfläche des gefährlichen Virus kennen und kann dagegen eine Immunität entwickeln.

Während der Ebola-Epidemie im Herbst vergangenen Jahres veröffentlichten Forscher die Ergebnisse eines Experiments, bei dem sie Makaken mit einem MVA-Vektor geimpft hatten, der ein Ebola-Eiweiß trug. Das Studienergebnis schlug hohe Wellen, denn offensichtlich ließ sich bei einem Test an Makaken tatsächlich eine Immunität aller Affen gegen Ebola erreichen.

Ebola gehört zu den Krankheiten, die immer wieder für Aufsehen sorgen, gemessen an den Todeszahlen von Grippe, Malaria oder Tuberkulose aber eher zu den unbedeutenderen Krankheiten zählen. „Insofern hatte die Industrie bisher nur ein eingeschränktes Interesse an der teuren Entwicklung von Ebola-Impfstoffen“, sagt Genzel. Daher hofft sie, mit einem effizienten technischen Verfahren zur Entwicklung einer kostengünstigen Impfstoffproduktion beitragen zu können. Das ist durchaus vorstellbar, denn der Markt für Impfstoffe ist, nicht zuletzt durch das häufige Auftreten von Geflügel- oder Schweinegrippe, in den letzten Jahren enorm gewachsen. So wurde mit Impfstoffen im Jahr 2001 noch ein Umsatz von 6,9 Milliarden US-Dollar erreicht. 2009 waren es schon 25,2 Milliarden, und für 2015 wird ein Umsatz von 56 bis 64,2 Milliarden Dollar erwartet.

Trotzdem liegt noch viel Arbeit vor den Magdeburgern. „Ein Virus sieht zwar simpel aus. Aber es ist ungeheuer wandlungsfähig und in einem gewissen

Maß unberechenbar“, sagt Reichl. „Ein Grippevirus hat nur acht Gen-Einheiten, die die Information für die Synthese von einem guten Dutzend Proteinen enthalten – früher dachte ich, ein solches Virus müsse leicht zu durchschauen sein. Doch dem ist nicht so.“

Eine Unwägbarkeit sind etwa Zuckerstrukturen an der Oberfläche des Hämagglytinins, denn sie beeinflussen die Wirksamkeit des Virus entscheidend mit. So ist seit einigen Jahren bekannt, dass sehr viele Proteine eines Organismus nicht als reines Eiweiß durch den Körper wandern, sondern Zuckeranhänger tragen. Experten sprechen von Glykosylierung.

Für Reichl heißt das: „Wenn wir die Vermehrung der Viren und die Wirkung von Impfstoffen besser verstehen wollen, müssen wir die Glykosylierung ihrer Proteine ergründen.“ Mit der Gly-

kosylierung dringt er bis auf die molekulare Ebene vor. „Glücklicherweise haben wir am Institut die Ausstattung und die Wissenschaftler, um den Aufbau und die Zusammensetzung dieser Zuckerstrukturen zu analysieren.“

Reichl weiß, dass der Mensch das Spiel gegen die Viren niemals gewinnen wird. „Es sind zu viele Viren um die Ecke. Aber wenn wir den richtigen Impfstoff in großer Menge herstellen können, ist schon viel erreicht.“ Was das Grippevirus betrifft, gibt es für ihn noch einen Grund für die Forschung an technischen Verfahren und an Alternativen zum Ei. Sollte sich nämlich eine Vogelgrippe zur Pandemie auswachsen, dann könnte es eng werden. „Wenn Sie die Geflügelbestände not-schlachten müssen, um das Virus zu stoppen – wie wollen Sie dann Eier für die Impfstoffe produzieren?“ ▶

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Etablierte Produktionsverfahren für Impfstoffe, die mit bebrüteten Hühnereiern arbeiten, können den Bedarf etwa bei einer weltweiten Grippe-Pandemie vermutlich nicht decken.
- Forscher des Max-Planck-Instituts für komplexe technische Systeme erforschen daher die Möglichkeit, große Mengen etwa eines Grippe-Impfstoffs in tierischen Zellkulturen herzustellen.
- Um die Konzentration tierischer Zellen in einer Nährösung zu steigern und somit letztlich möglichst viele Viren für einen Impfstoff zu erhalten, variieren die Magdeburger Wissenschaftler systematisch alle Faktoren der Zellzüchtung. Sie suchen auch den optimalen Zeitpunkt, um die Impfviren mit größtmöglicher Ausbeute aus der infizierten Zellkultur zu ernten.
- Mit ihrem Verfahren können Max-Planck-Forscher nicht nur Grippeviren erzeugen, sondern auch MVA-Viren, die für Impfstoffe gegen Ebola und HIV interessant sind.

GLOSSAR

Adhärente Zellen: Tierische Zellen, die für ihre Vermehrung eine Oberfläche besiedeln müssen.

Glykosylierung: Viele Proteine sind glykosyliert, das heißt mit Zuckern verbunden, die für die Funktion der Eiweiße und auch für ihre Wirkung in Impfstoffen wichtig sind.

Hämagglytinin: Eiweiß auf der Oberfläche eines Grippevirus, mit dessen Hilfe das Virus an eine Wirtszelle bindet und in sie eindringt.

Hochzelldichte-Kultivierung: Zellkultur mit einer Konzentration von mehreren Zehn bis mehreren Hundert Millionen Zellen pro Milliliter Nährösung.

Neuraminidase: Ein weiteres Eiweiß auf der Virenoberfläche, das für die Abschnürung neu gebildeter Viren von einer infizierten Zelle wichtig ist.



Leben im Wechselbad

Der Klimawandel verändert die Tier- und Pflanzenwelt der Erde tiefgreifend. Das liegt nicht nur an dem weltweiten Anstieg der Durchschnittstemperaturen, sondern auch an Änderungen bei den Temperaturschwankungen sowohl zwischen Tag und Nacht als auch zwischen Sommer und Winter.

George Wang, Wissenschaftler am **Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie**, analysiert Klimadaten, um den Einfluss der veränderten Bedingungen auf Flora und Fauna zu erforschen.

TEXT UTE KEHSE

Der November ist kein schöner Monat in Deutschland. Er ist normalerweise nass-kalt, grau und ungemütlich. Die Bäume werfen endgültig ihre Blätter ab, die Stauden verwelken, viele Tiere suchen sich ein Quartier für den Winterschlaf. Doch im Spätherbst 2014 lebte die Natur noch einmal auf: Die Forsythien blühten in voller Pracht, Igel wanderten putzmunter durch die Gärten, und die Erdbeeren trieben neue Knospen.

Was war schiefgelaufen? „Die ungewöhnlich milden Temperaturen haben den Pflanzen ein falsches Signal gegeben“, sagt George Wang. Der Spätherbst fühlte sich im vergangenen Jahr sehr

frühlingshaft an – womöglich ein Indiz dafür, dass sich die Temperaturunterschiede zwischen den Jahreszeiten verringern. Die Temperatur ist für die Gewächse in den gemäßigten Klimazonen jedoch der wichtigste Indikator dafür, welche Jahreszeit gerade herrscht. Klettert das Thermometer auf über 20 Grad, nehmen die Pflanzen an, dass der Frühling ausgebrochen ist – und bilden selbst im November noch Blüten oder neue Triebe aus. Das ist freilich eine Fehlinvestition: Beim nächsten Nacht-frost sterben die zarten Blättchen ab. Wang, Biologe am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen, sieht in den Auswirkungen der Wetterkapriolen Ende 2014 ein Beispiel für ei-

nen möglichen Trend, den er kürzlich entdeckt hat: „Ähnliche Ereignisse“, so sagt er, „können wir in Zukunft häufiger erleben.“

Der Zusammenhang zwischen Umwelt und der Physiologie von Lebewesen ist das Spezialgebiet von George Wang. Ihn interessiert, wie sich der Klimawandel auf Tiere und Pflanzen und auf die Evolution auswirkt. „Alle physiologischen Prozesse hängen von der Temperatur ab“, sagt der aus den USA stammende Forscher mit taiwanesischen Wurzeln, der seit vier Jahren in Tübingen arbeitet.

Biochemische Vorgänge etwa laufen bei höheren Temperaturen schneller ab, der Stoffwechsel wechselt wärmer

Tag und Nacht im globalen Wandel: Die täglichen Temperaturschwankungen nehmen infolge des Klimawandels weltweit zu. Das kann vielfältige ökologische Folgen auch für Wälder haben.



Empfindlich für Klimaveränderungen: Die Wanderungen von Zugvögeln (oben) werden vor allem durch das Wetter und kurzfristige Klimaschwankungen beeinflusst. Dass die jahreszeitlichen Temperaturunterschiede in gemäßigten Breiten abnehmen, wirkt sich auch auf Pflanzen aus: Wenn einem warmen Winter ein frostiger Schneetag folgt, können Blüten wie die der Forsythie (unten) künftig häufiger erfrieren. Die Energie für die Blütenbildung hat die Pflanze dann umsonst investiert. Auch der Energiebedarf tropischer Lebewesen kann mit dem Klimawandel wachsen: Schon kleinste Temperaturerhöhungen steigern hier die Stoffwechselrate von Reptilien wie etwa von Waranen (ganz unten).



Tiere beschleunigt sich also. Populationen mancher Insekten vermehren sich wesentlich schneller, wenn es wärmer ist. Andere Tiere wiederum verkraften große Hitze überhaupt nicht gut. Daher verändern sich auch ökologische Beziehungen, wenn die Temperaturen sich verändern – zum Beispiel, welche Nahrung Vögeln in welchem Monat zur Verfügung steht oder welches Insekt eine bestimmte Blüte bestäuben kann.

Ein Beispiel für solche Zusammenhänge hat Wang vor vier Jahren entdeckt: Mit seinen US-Kollegen Michael Dillon von der University of Wyoming und Raymond Huey von der University of Washington in Seattle berechnete er, wie sich der Klimawandel auf den Stoffwechsel von wechselwarmen Tieren in den Tropen auswirkt. Das überraschende Ergebnis: Die Temperaturen in den Tropen haben sich seit 1980 zwar kaum erhöht, sie stiegen lediglich um wenige zehntel Grad Celsius. Doch selbst diese kleine Änderung lässt die

Stoffwechselrate von Reptilien, Amphibien und Wirbellosen Tieren stark ansteigen. Sie nimmt den Berechnungen zu folge genauso stark zu wie die von Tieren in gemäßigten Breiten, wo die Temperaturen viel stärker angestiegen sind. „Das liegt daran, dass die Stoffwechselrate exponentiell von der Temperatur abhängt“, berichtet Wang. Für tropische Echsen, Lurche und Insekten bedeutet das, dass sie bei steigenden Temperaturen deutlich mehr Nahrung brauchen und womöglich weniger Energie für die Fortpflanzung übrig haben.

TEMPERATURZYKLEN IM GLOBALEN WANDEL

Dillon und Wang hätten gern auch untersucht, wie sich die Stoffwechselrate der Tropentiere in der Zukunft entwickelt. Doch dabei standen sie vor einem typischen Problem: Weil der Einfluss der Temperatur nichtlinear ist, genügt es nicht, eine Prognose für die Durch-



schnittstemperatur zu kennen. „Wenn man Fragen der Ökologie untersuchen will, muss man auch Temperaturvariationen erfassen“, betont Wang. Studien dazu waren bislang allerdings rar.

„Einige Kollegen haben zwar Veränderungen bei den Temperatur-Extremen untersucht, aber auch dort wurden die Werte meist gemittelt“, sagt er. Das Leben der meisten Tiere und Pflanzen wird dagegen vor allem von kurzperiodischen Schwankungen beeinflusst, etwa vom Wechsel der Temperaturen zwischen Tag und Nacht. Auch die Jahreszeiten spielen eine wichtige Rolle für Flora und Fauna – ganz besonders für die Lebensgeschichte vieler Organismen, die lediglich wenige Tage oder Wochen existieren.

Wie sich diese Zyklen im Zuge des globalen Wandels während der letzten Jahrzehnte verändert haben, war bislang kaum bekannt. „Solche hochfrequenten Klimaschwankungen lassen sich nur schwer charakterisieren, weil es dazu oft nur mangelhaft aufgelöste Daten gibt und es auch an Analysetechniken fehlt“, sagt Wang.

Schon 2007, während seiner Doktorarbeit an der University of Washington, stieß er auf dieses Problem. Damals untersuchte er ein Lieblingstier der Biologen, die Fruchtfliege *Drosophila melanogaster*. Er wollte herausfinden, wie das Insekt auf Hitzestress reagiert – und anschließend Vorhersagen dafür ableiten, wie sich das Verhalten der Fliegen durch den Klimawandel verändert. „Das ging aber nicht, weil die entsprechenden Klimadaten fehlten“, berichtet er. Zusammen mit Michael Dillon hat Wang da nun Abhilfe geschaffen.

Das mathematische Mittel der Wahl, um periodische Veränderungen in größeren Datenbergen zu identifizieren, ist die sogenannte Fourier-Transformation. „Sie funktioniert aber eigentlich nur bei perfekten Daten“, sagt Wang. Klimadaten sind jedoch notorisch unvollständig und uneinheitlich: Die eine Wetterstation misst die Temperatur vielleicht einmal pro Stunde, eine andere dagegen lediglich alle vier Stunden. Außerdem gibt es immer wieder einmal Datenlücken, weil Sensoren ausfallen oder gewartet werden.

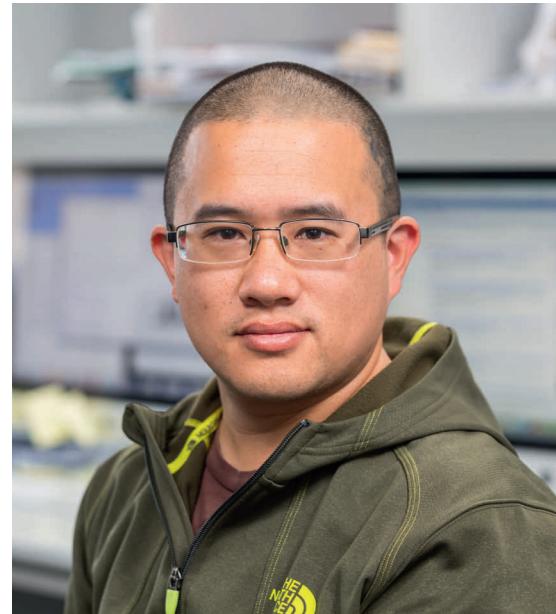
Da ähnliche Probleme auch in der Astrophysik auftauchen, wandelten Wang und Dillon eine bislang vor allem dort genutzte mathematische Methode etwas ab, um die hochfrequenten Zyklen in Klimadaten aufzuspüren zu können. In der Zeitschrift NATURE CLIMATE CHANGE stellten sie die Ergebnisse im September 2014 vor.

DIE DATEN STAMMEN VON FAST 8000 WETTERSTATIONEN

Dass man als Biologe in der Lage sein muss, mit großen Datenmengen umzugehen und selbst zu programmieren, hält Wang für selbstverständlich: „Daraum kommt heute niemand mehr herum.“ Für ihre Studie trugen er und Dillon mehr als eine Milliarde Temperaturmessungen zusammen. Die Daten stammten von fast 8000 Wetterstationen weltweit und waren zwischen 1926 und 2009 aufgenommen worden.

Weil die Daten so umfangreich waren, mussten die beiden Forscher mehrere Großrechner in Deutschland und den USA in Beschlag nehmen. Aus den Messungen ermittelten sie zunächst die Durchschnittstemperaturen sowie die täglichen und jahreszeitlichen Temperaturschwankungen an den verschiedenen Breitengraden. Die Durchschnittstemperaturen, die die Forscher ermittelten, spiegelten die Klimazonen der Erde wider: In den gesamten Tropen, zwischen dem 23. Grad nördlicher und dem 23. Grad südlicher Breite, herrschen, aufs Jahr gemittelt, in etwa die gleichen Temperaturen von rund 25 Grad Celsius. Je weiter man nach Norden oder Süden kommt, desto kälter wird es im Jahresdurchschnitt.

Die täglichen Temperaturschwankungen folgen freilich keinem eindeutigen Trend vom Äquator zu den Polen: Gemittelt über den gesamten Zeitraum, für den die Forscher Wetterdaten analysierten, sind die täglichen Temperaturschwankungen in den hohen Breiten

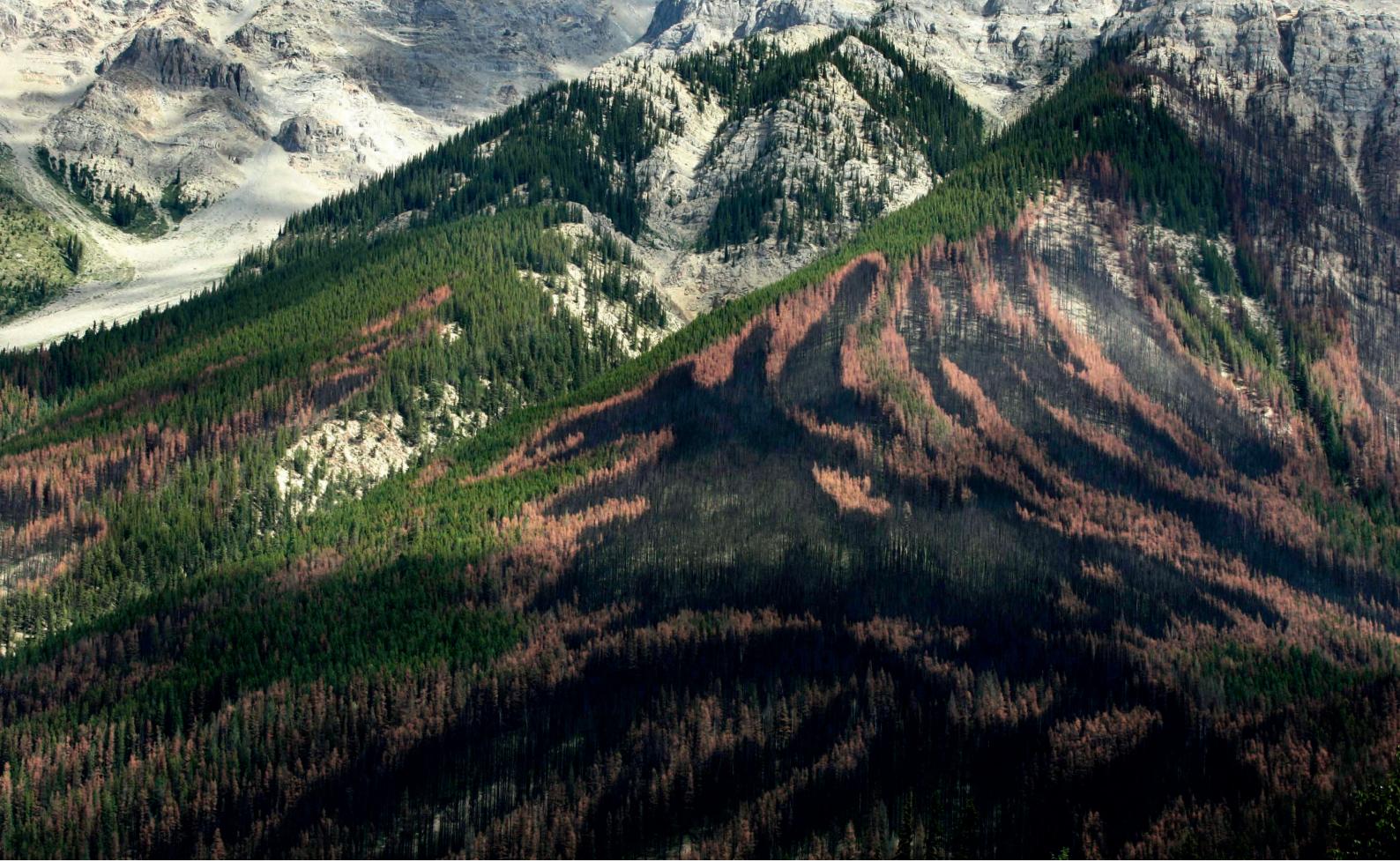


Klimaforschung für die Biologie: George Wang befasst sich mit den globalen Veränderungen der Temperaturzyklen und deren Auswirkungen auf Flora und Fauna.

am niedrigsten. In den gemäßigten Breiten erreichen sie Spitzenwerte von bis zu 15 Grad Celsius. In den Tropen liegt die Differenz überall bei etwa sechs Grad.

Die jahreszeitlichen Schwankungen verhalten sich dagegen ganz anders als die täglichen Variationen: In hohen Breiten sind sie am stärksten ausgeprägt, am Äquator dagegen kaum zu spüren. An einzelnen Orten in Sibirien oder Kanada beispielsweise können zwischen Sommer und Winter mehr als 60 Grad Celsius liegen. Auf der Südhalbkugel schwanken die Temperaturen zwischen Sommer und Winter insgesamt weniger stark – vermutlich, weil die Landmassen kleiner sind und die Ozeane dadurch einen größeren Einfluss haben.

Um herauszufinden, in welchen Breitengraden die täglichen und in welchen die jahreszeitlichen Schwankungen wichtiger sind, bildeten Wang und Dillon eine neue mathematische Größe, die die Schwankungsbreite beider Zyklen ins Verhältnis zueinander setzt. >



Schädling als Gewinner: Manche Tiere in höheren Breiten wie der Bergborkenkäfer passen sich an die wachsenden Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht an. Sie tolerieren dann auch tiefere Temperaturen. Daher bringen die Borkenkäfer in Amerika inzwischen pro Jahr zwei Generationen von Schädlingen hervor und schädigen deutlich mehr Bäume. Um die Verluste einzudämmen, werden befallene Waldflächen kontrolliert niedergebrannt.

Wie die Auswertung ergab, lassen sich die Tropen, die gemäßigten Zonen und die hohen Breiten nicht nur anhand der Durchschnittstemperaturen voneinander abgrenzen, sondern auch durch das Verhältnis zwischen den jahreszeitlichen und den täglichen Temperaturzyklen: In den Tropen ist der Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht größer als der zwischen Sommer und Winter. Für die Natur spielen die Jahreszeiten folglich bloß eine untergeordnete Rolle. Die Pflanzen grünen und blühen das ganze Jahr über, und die Tiere unternehmen keine größeren Wanderungen.

Allerdings enthielt die Berechnung, dass die Temperaturen, über ein Jahr gesehen, nicht überall in den Tropen so gleichförmig verlaufen wie bislang angenommen. Nur innerhalb eines Be-

reichs wenige Breitengrade nördlich und südlich des Äquators gibt es praktisch keine jahreszeitlichen Veränderungen.

FLORA UND FAUNA IM RHYTHMUS DER JAHRESZEITEN

Je weiter man sich allerdings vom nullten Breitengrad entfernt, desto stärker gewinnen Sommer und Winter doch an Einfluss – auch wenn die Durchschnittstemperatur genauso hoch ist wie am Äquator. „Unsere Analyse enthüllt, dass sich die jahreszeitliche Temperaturvariabilität innerhalb der Tropen, abhängig vom Breitengrad, stark verändert – mit unbekannten ökologischen Folgen“, so Wang.

Ziemlich genau an der Grenze der Tropen kehrt sich das Verhältnis zwischen jahreszeitlichen und täglichen

Temperaturschwankungen um: Auf der Höhe der Wendekreise sind sie etwa gleich groß. In den gemäßigten Breiten dagegen schwanken die Temperaturen im Verlauf eines Jahres mehr als doppelt so stark wie im Verlauf eines Tages. „In Deutschland ist es nachts im Schnitt vielleicht zehn Grad kälter als tagsüber, während zwischen Sommer und Winter ungefähr 25 Grad liegen“, berichtet George Wang. Als Folge unterliegen Tier- und Pflanzenwelt ausgeprägten jahreszeitlichen Rhythmen.

Als Nächstes untersuchten Wang und Dillon, wie sich die Temperaturzyklen weltweit zwischen 1975 und 2013 veränderten. In ihren Daten fanden sie den bekannten globalen Temperaturanstieg wieder: An den Polen kletterten die Temperaturen in diesem Zeitraum am stärksten, um 1,2 Grad



Die Temperaturverteilung auf der Welt wird insgesamt flacher – die Unterschiede zwischen den verschiedenen Klimazonen verringern sich also.

Celsius. In den gemäßigten Klimazonen wurde es 0,7 Grad wärmer und in den Tropen um 0,4 Grad.

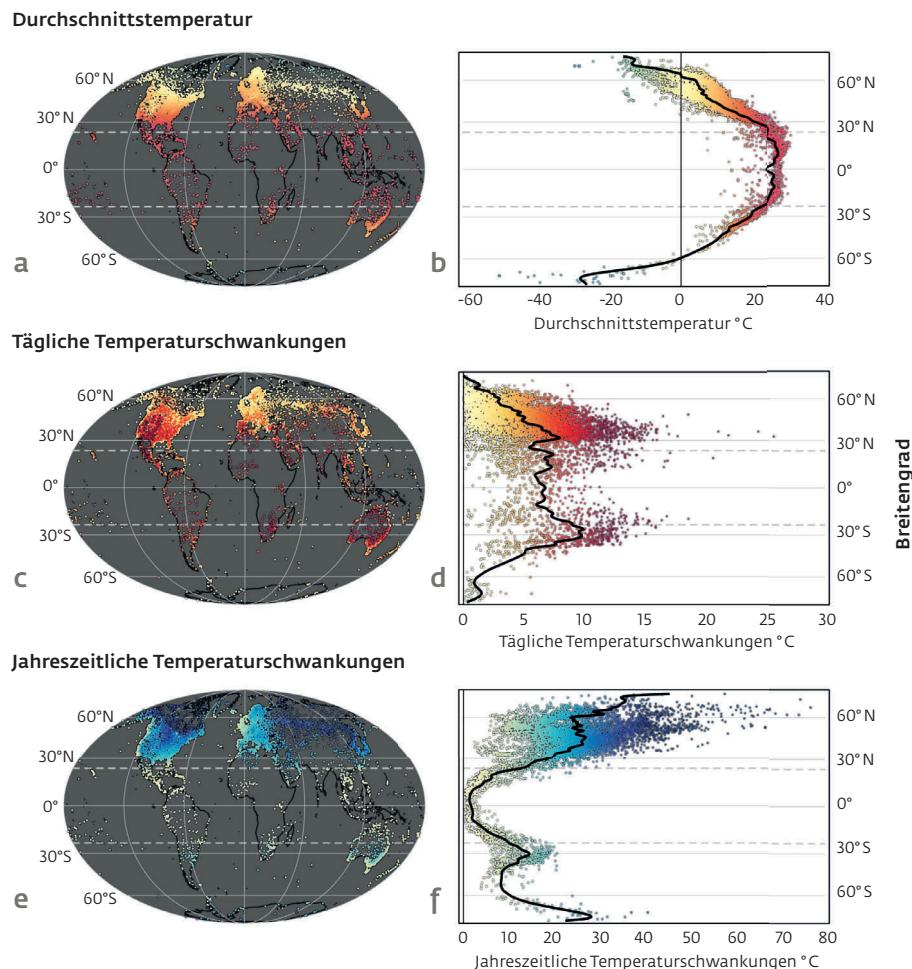
Zur Überraschung der Forscher veränderten sich auch die täglichen Temperaturschwankungen in diesem Zeitraum stark – und sie folgten dem gleichen Muster: Auch hier zeigte sich an den Polen die stärkste Veränderung, der Unterschied zwischen Tag- und Nachttemperaturen erhöhte sich um 1,4 Grad Celsius. In den gemäßigten Breitengraden waren es 1 Grad und in den Tropen 0,3 Grad. Die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen verringerten sich dagegen an den Polen und in den gemäßigten Breiten bis etwa 2010, und zwar um 1,4 und 0,3 Grad Celsius. In den letzten drei Jahren der Analyse stiegen die Werte aber wieder leicht an. In den Tropen gab es dagegen kaum Veränderungen.

Wang und Dillon zufolge zeigt sich in ihren Daten eine Verschiebung der Klimazonen: „Die täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen in höheren Breitengraden haben sich einander angenähert, die Temperaturvariationen sind sozusagen tropischer geworden“, erläutert Wang. Das bedeutet freilich nicht, dass die Jahreszeiten verschwunden, betont er. Die Temperaturverteilung auf der Welt wird jedoch insgesamt „flacher“ – die Unterschiede zwischen den verschiedenen Klimazonen verringern sich also.

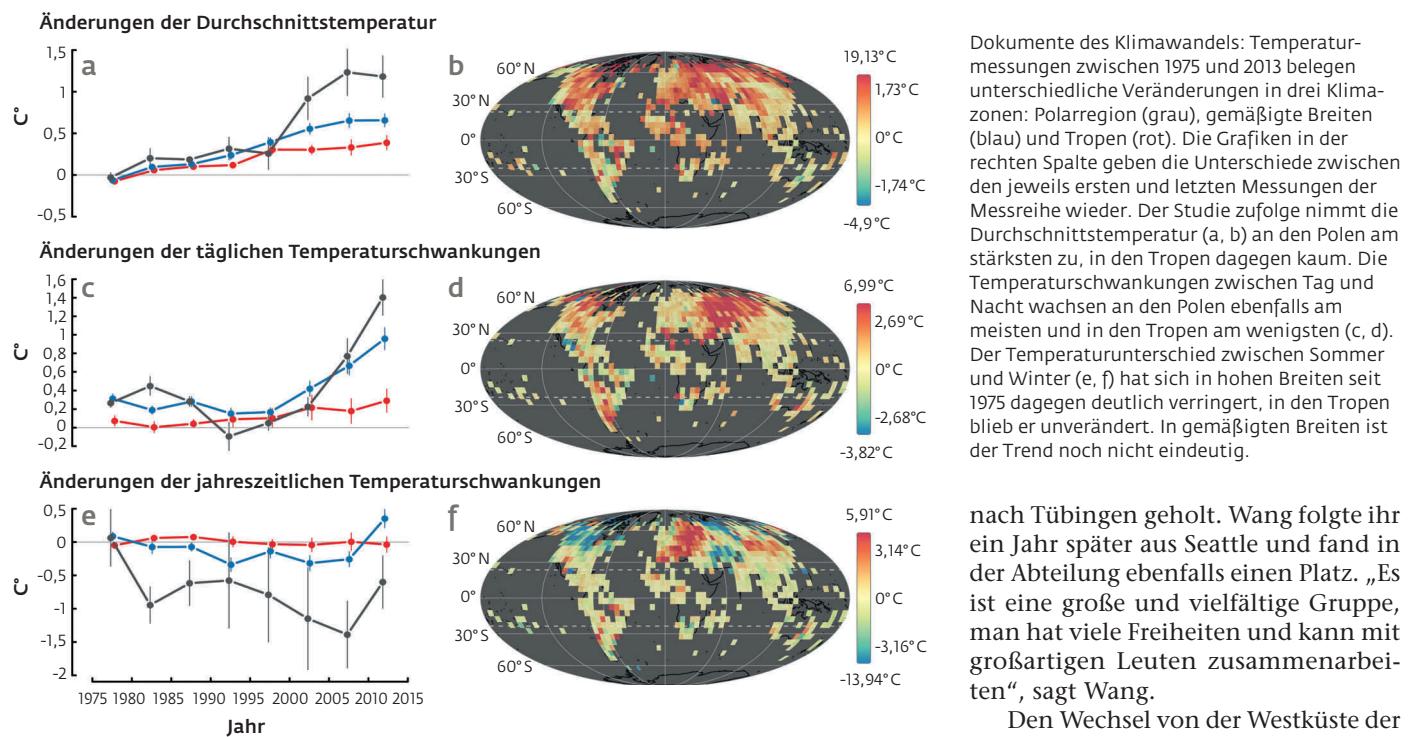
Eine Erklärung für dieses Phänomen liefern die beiden Biologen nicht. „Wir sind keine Klimaforscher“, betont Wang. Ob die Veränderungen auf die globale Erwärmung zurückzuführen sind, ist daher unklar. Möglicherweise spielen langfristige Verlagerungen der Luftströmungen in der Atmosphäre eine Rolle, möglicherweise auch ein Phänomen namens *global dimming* („globale Verdunkelung“). Messungen zeigten, dass zwischen 1960 und 1990 immer weniger direkte Sonneneinstrahlung den Boden erreichte, wahrscheinlich als Folge steigender Luftverschmutzung.

Seit 1990 hat sich der Trend allerdings umgekehrt, wodurch vor allem in hohen Breiten wieder mehr Sonnenlicht den Boden erreicht. Das könnte dazu beigetragen haben, den täglichen Lauf der Temperaturen stärker ausschlagen zu lassen, vermutet der Klimaforscher Alexander Stine von der San Francisco State University in einem Kommentar in *NATURE CLIMATE CHANGE*.

George Wang interessiert sich für die ökologischen Folgen der Veränderungen. Und die sind möglicherweise vielfältig – für Mensch, Natur und Landwirtschaft: So könnten kurzlebige Insekten, die in mittleren Breiten bislang nur in der warmen Jahreszeit auftauchen, in Zukunft möglicherweise das ganze Jahr über gedeihen. „Wenn sich die Temperaturunterschiede zwischen Tag und



Klimazonen im Profil: Mit mehr als 7900 Messdaten untersuchten die Wissenschaftler, wie die Temperaturvariationen von der geografischen Lage abhängen. Die linken Grafiken zeigen farblich die Ergebnisse pro Messstation. Ermittelt wurde etwa die Durchschnittstemperatur, welche zu den Polen hin abnimmt (a, b). Die Temperaturvariationen zwischen Tag und Nacht sind im langjährigen Mittel an den Polen am niedrigsten und in gemäßigten Breiten am größten, in den Tropen betragen sie im Schnitt etwa sechs Grad (c, d). Die Unterschiede der jahreszeitlichen Schwankungen nehmen in Richtung der Tropen ab (e, f).



Nacht erhöhen, entsteht ein Selektionsdruck, der die Tiere zwingt, größere Temperaturschwankungen auszuhalten“, erläutert Wang. „Ihre Physiologie könnte sich so auch an das Winterwetter anpassen.“ In Amerika kann etwa der Bergkiefernkäfer, eine Borkenkäferart, mittlerweile zwei Generationen pro Jahr hervorbringen und nicht nur eine, wie früher. Die Insekten befallen folglich wesentlich mehr Bäume und haben in den vergangenen Jahren in Teilen der Rocky Mountains geradezu eine Spur der Verwüstung hinterlassen.

Auch die Übertragung des Malaria-Erregers hängt von den täglichen Temperaturschwankungen ab, wie eine Studie 2010 zeigte. Eine andere Untersuchung ergab, dass die Wanderungen von Zugvögeln ebenfalls vor allem vom Wetter beeinflusst werden und weniger von langfristigen Klimatrends. Bei der Ackerschmalwand, einer wichtigen Modellpflanze der Biologen, hängt die Überwinterungsstrategie Untersuchungen zufolge sowohl von Umweltsignalen als auch von genetischen Faktoren ab. Stärkere Temperaturschwankungen könnten somit bei Pflanzen ebenfalls einen Selektionsdruck erzeugen.

Mit den molekularen Mechanismen, die die Anpassung von Pflanzen steuern, befasst sich der Großteil der Abteilung, zu der George Wang gehört: „Wir un-

tersuchen genetische Variationen im Grenzgebiet von Genetik, Genomik und Ökologie“, sagt Detlef Weigel, der Direktor der Abteilung „Molekularbiologie“ am Tübinger Max-Planck-Institut. In dieser Gruppe ist George Wang mit seinen Forschungsfragen eher ein Exot.

Dass er überhaupt nach Tübingen kam, hatte vor allem private Gründe: Seine Frau, die Molekularbiologin Beth Rowan, wurde von Detlef Weigel 2009

Dokumente des Klimawandels: Temperaturmessungen zwischen 1975 und 2013 belegen unterschiedliche Veränderungen in drei Klimazonen: Polarregion (grau), gemäßigte Breiten (blau) und Tropen (rot). Die Grafiken in der rechten Spalte geben die Unterschiede zwischen den jeweils ersten und letzten Messungen der Messreihe wieder. Der Studie zufolge nimmt die Durchschnittstemperatur (a, b) an den Polen am stärksten zu, in den Tropen dagegen kaum. Die Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht wachsen an den Polen ebenfalls am meisten und in den Tropen am wenigsten (c, d). Der Temperaturunterschied zwischen Sommer und Winter (e, f) hat sich in hohen Breiten seit 1975 dagegen deutlich verringert, in den Tropen blieb er unverändert. In gemäßigten Breiten ist der Trend noch nicht eindeutig.

nach Tübingen geholt. Wang folgte ihr ein Jahr später aus Seattle und fand in der Abteilung ebenfalls einen Platz. „Es ist eine große und vielfältige Gruppe, man hat viele Freiheiten und kann mit großartigen Leuten zusammenarbeiten“, sagt Wang.

Den Wechsel von der Westküste der USA ins beschauliche Schwabenland hat der in Los Angeles aufgewachsene Biologe jedenfalls nicht bereut. „Tübingen ist großartig“, sagt er – und lobt insbesondere die Kinderbetreuung in der Universitätsstadt. Dass die Temperaturen in Deutschland nicht so angenehm sind wie in seiner kalifornischen Heimat – und der Winter hier zumindest manchmal Schnee und zweistellige Minusgrade mit sich bringt –, das spielt für ihn daher keine große Rolle. ▲

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Der Klimawandel hat vielfältige ökologische Folgen, nicht nur weil die Durchschnittstemperaturen steigen, sondern auch weil sich die Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht sowie zwischen den Jahreszeiten verändern. Das kann sich etwa auf die Stoffwechselrate wechselwärmer Tiere auswirken.
- Um den künftigen Einfluss des Klimawandels auf Flora und Fauna im Detail untersuchen zu können, haben George Wang vom Max-Planck-Institut für Entwicklungsbioologie und Michael Dillon von der University of Wyoming anhand von Klimadaten die hochfrequenten Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht sowie zwischen Sommer und Winter analysiert.
- Die verschiedenen Klimazonen, sprich: Tropen, gemäßigte und hohe Breiten, lassen sich sowohl anhand der Durchschnittstemperaturen als auch anhand der kurzperiodischen Temperaturschwankungen unterscheiden. Dabei dominiert in den Tropen der Einfluss des Tag-Nacht-Zyklus, während der Einfluss der Jahreszeiten in den gemäßigten Breiten und an den Polen überwiegt.
- Vermutlich durch den Klimawandel verändern sich die kurzfristigen Temperaturschwankungen: Wie die Durchschnittstemperaturen nahmen die täglichen Temperaturschwankungen seit 1975 an den Polen am stärksten zu und in den Tropen am wenigsten. Die jahreszeitlichen Veränderungen nahmen dagegen vermutlich vor allem in den hohen, aber auch in den gemäßigten Breiten ab. In der Folge gleichen sich kurzperiodische Temperaturvariationen in höheren Breiten dem Muster der Tropen an.

2015

KlarText!
KlarText!
KlarText!
KlarText!

Klaus Tschira Preis
für verständliche
Wissenschaft



Mit KlarText punkten!

Bewerben Sie sich

um KlarText!, den Klaus Tschira Preis für verständliche Wissenschaft 2015.

Die Klaus Tschira Stiftung zeichnet jährlich Wissenschaftler aus, die die Ergebnisse ihrer herausragenden Dissertation in einem allgemein verständlichen Artikel beschreiben.

20.
•
•
•
•

Bewerbungsbedingungen

- Promotion 2014 in Biologie, Chemie, Informatik, Mathematik, Neurowissenschaften, Physik oder einem angrenzenden Fachgebiet
- Herausragende Forschungsergebnisse
- Ein allgemein verständlicher Textbeitrag über die eigene Forschungsarbeit
- Einsendeschluss: 28. Februar 2015

Mitmachen lohnt sich

- 5000 Euro Geldpreis pro Gewinner in jedem der sechs Fachgebiete
- Veröffentlichung der Siegerbeiträge in einer KlarText!-Sonderbeilage des Wissenschaftsmagazins *bild der wissenschaft*
- **Jeder Bewerber** kann am zweitägigen Workshop Wissenschaftskommunikation teilnehmen.

www.klaus-tschora-preis.info



Grauzone Schwarzmarkt

Die Abgrenzung ist alles andere als einfach: Seit 2012 widmet sich das **Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung** in Köln dem Themenfeld „Illegale Märkte“. Doch nicht überall sind Herstellung, Vertrieb und Konsum gleichermaßen kriminell wie bei Drogen oder Kinderpornografie. Wissenschaftliche Mitarbeiter und Doktoranden um Direktor **Jens Beckert** forschen zu Produktfälschungen in Argentinien, zum Abbau und Handel mit Diamanten in Sierra Leone, zum Handel mit Rhinoceroshorn und zu Finanzmarktkriminalität – ein Blick auf ein innovatives, wirtschaftssoziologisches Projekt.

„Die Übergänge sind fließend“

Kein Markthandeln findet ausschließlich illegal statt, nie ist es völlig abgetrennt von der legalen Wirtschaft.

Jens Beckert, Direktor am Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, findet die Übergänge zwischen den Ökonomien darum besonders interessant.

Warum beschäftigen Sie sich am MPIfG mit illegalen Märkten?

Jens Beckert: In meinem Forschungsbereich befassen wir uns vor allem mit der Soziologie des Marktes. Bislang sind wir dabei stillschweigend von der Annahme ausgegangen, dass sich Markthandeln vor allem im legalen Rahmen abspielt. Mit dem neuen Forschungsbereich wollen wir austesten, inwiefern sich bisherige Fragestellungen und Methoden auch auf die Erforschung von illegalen Märkten ausweiten lassen.

Welche neuen Erkenntnisse erhoffen Sie sich dabei?

Illegalen Märkte sind zunächst einmal interessant, weil sie eine erhebliche wirtschaftliche und soziale Bedeutung haben. Über die Beschäftigung damit erfährt man aber indirekt auch etwas über die Voraussetzungen, auf denen legale Märkte aufbauen. Man kann zum Beispiel sehr gut erkennen, welche Folgen es hat, wenn bestimmte unterstützende Strukturen wegfallen, etwa der Schutz von Eigentumsrechten. Akteure auf illegalen Märkten müssen miteinander kooperieren, ohne sich auf den Rechtsschutz des Staates verlassen zu können. Dies hat enorme Auswirkungen auf die Organisation dieser Märkte.

Welche Folgen sind dies?

Auf illegalen Märkten sind die Beziehungen der Wirtschaftsakteure untereinander fast vollständig beschränkt auf persönliche Netzwerke, in denen enge Vertrauensbeziehungen aufgebaut werden können, wo aber auch Fehlverhalten schnell bestraft werden kann. Das hat dann aber auch Folgen für die Organisationsform: Unternehmen können sich nicht so stark ausdehnen wie in der legalen Wirtschaft. Illegalen Märkte kommen sozusagen nicht aus ihren Kinderschuhen heraus.

Was sind Ihre Forschungsfragen?

Uns interessiert, wie die Kooperation der Marktteilnehmer unter Bedingungen des fehlenden Rechtsschutzes funktioniert? Wie organisiert sich Wettbewerb? Wie kön-

nen Abnehmer von illegalen Waren den Wert eines Produktes erkennen? Schließlich gibt es für illegale Waren, seien es nun gefälschte Markenprodukte oder Drogen, weder Werbung noch Produktsiegel oder eine Stiftung Warentest. Ein Beispiel: Bei den Imitaten von Markenkleidung gibt es tatsächlich unterschiedliche Qualitäten – und es gibt auch ein verbreitetes Know-how, wie man diese erkennen kann. Darauf sind wir bei der Recherche in Onlineforen gestoßen. Interessanterweise aber werden viele Konsumenten, die gezielt Produktimitate kaufen – das haben wir beobachtet –, das Gefühl, es mit einer Fälschung zu tun zu haben, nie ganz los. Selbst wenn sie ihre Umwelt erfolgreich täuschen. Denn in ihrem Herzen sind diese Konsumenten Markenfans. Dieses Phänomen könnte auch erklären, warum die Industrie oft nur halbherzig gegen Markenpiraterie vorgeht: Gewissermaßen trägt der Handel mit Imitaten zur Werthaltigkeit der Marke bei.

Werden die Forschungsergebnisse auch für die Politikberatung relevant sein?

Wir haben in erster Linie ein systematisches Interesse. Deshalb haben wir zum Auftakt des Projekts auch eine umfangreiche Untersuchung durchgeführt, in der wir versuchten, die verschiedenen Formen illegaler Märkte gegeneinander abzugrenzen. Dennoch sind die Ergebnisse einzelner Forschungsprojekte auch ganz unmittelbar praxisrelevant. Bei der Untersuchung zum Handel mit Rhinoceroshorn im südlichen Afrika zum Beispiel hat unsere Wissenschaftlerin herausgefunden, dass Wilderer, die das Horn liefern, den Arten- schutz als eine Fortsetzung kolonialer Ent rechtung sehen. Diese Tatsache wird man bei Maßnahmen zum Schutz der Nashörner berücksichtigen müssen.

Ist es für Wissenschaftler nicht sehr schwierig, sich Zugang zu Informationen über illegale Märkte zu verschaffen?

Ehrlich gesagt, ich war überrascht, als wie leicht sich die Informationsbeschaffung letztendlich herausstellt. Unsere Wissenschaftler haben beispielsweise Gefängnis-



Jens Beckert

insassen interviewen können. Auch Gerichtsakten und Polizeidokumente sind für die Erforschung illegaler Märkte eine große Hilfe. In wieder anderen Fällen hat sich der investigative Journalismus als informative Quelle erwiesen. Alle Forscher waren im Feld und hatten direkten Kontakt mit den Marktakteuren, die zumeist bereitwillig Auskunft erteilt haben. Zum Glück ist keiner der Forscher je in eine wirklich gefährliche Situation gekommen.

Welche anderen Überraschungen haben Sie bislang erlebt?

Eine echte Überraschung war festzustellen, wie eng legale und illegale Marktsegmente oftmals miteinander verbunden sind – vor allem in solchen Bereichen, wo ungesetzliche Praktiken von den Marktteilnehmern nicht zugleich als moralisch verwerflich eingestuft werden. Der fließende Übergang von Legalität und Illegalität zeigt sich auch in einem Bereich, in welchem wir eben erst ein neues Projekt begonnen haben: Finanzmarktkriminalität. Hier finden illegale Handlungen im Kontext völlig legaler Organisations- und Marktstrukturen statt. Uns ist klar geworden, dass die Verschränkung von legalen Strukturen und illegalen Handlungen mit zu den interessantesten Forschungsfragen in der Untersuchung illegaler Märkte gehört. Interview: Ralf Grötter



Erstaunliche Zusammenarbeit

Nina Engwicht / Protokoll: Ralf Grötker

In den Jahren des Bürgerkrieges terrorisierten Rebellen die Zivilbevölkerung in Sierra Leone, um an „Blutdiamanten“ zu kommen und mit ihnen im Tausch für Waffen aus Liberia zu handeln. Nach Kriegsende wurde der Diamantensektor sowohl im Land als auch auf internationaler Ebene umfassend reformiert. Das Ziel: Die gesamte Wertschöpfungs- und Handelskette sollte der staatlichen Kontrolle unterworfen werden. Das ist nur bedingt gelungen, wie Doktorandin Nina Engwicht herausfand.

In Sierra Leone spielten im Bürgerkrieg zwischen 1991 und 2002 Diamanten, die ohne Genehmigung abgebaut und unter Umgehung von Lizenzen und Zollbestimmungen gehandelt wurden, eine wichtige Rolle als illegale Währung und zur Geldwäsche. Beide werden üblicherweise als Faktoren dargestellt, die Kriminalität und terroristische Strukturen begünstigen und dadurch auch die Stabilität

der Nachkriegsgesellschaft gefährden. In meiner Studie schaue ich auf die Folgen des illegalen Diamantenmarktes. Mich interessiert, wie dieser Markt unter veränderten Kontextbedingungen im heutigen Sierra Leone funktioniert, wie verbreitet illegale Diamantenproduktion und -handel heute noch sind und in welcher Beziehung der illegale Diamantenmarkt zum legalen Markt und zum Staat steht.

Ich habe von Ende 2012 bis Juni 2013 sechs Monate im Land verbracht, um Interviews zu führen. Am meisten erstaunt haben mich die Gewaltlosigkeit und das hohe Maß an sozialer Integration und wie eng der legale und der illegale Markt für Diamanten verzahnt sind. Ich habe mir zum Beispiel die großen Marktplätze für illegalen Diamantenhandel angesehen. Sie sind gut organisiert: Es gibt für jeden dieser Märkte einen Vorsitzenden. Auf einem der untersuchten Marktplätze gab es neben diesem „Chairman“ auch einen Ältestenrat, einen Sekretär und einen Vizesekretär, einen Schatzmeister, einen Buchprüfer, einen PR-Befragten und weitere Posten. Wer auf einem solchen Markt als Händler tätig werden will, muss sich zuerst registriert lassen.

Das gesamte Marktgeschehen wird dominiert von Akteuren, die erstaunlich kollaborativ agieren, also eher reibungslos zusammenwirken. Die Händler verkaufen nicht nur an Endkunden, sondern immer wieder auch untereinander – es entsteht eine Wertschöpfungskette, von der viele Beteiligte profitieren können. Wenn es zu Konflikten kommt, werden diese durch den Vorsitzenden geschlichtet. Außerdem existiert eine Art Sozialfonds, in den alle Händler einzahlen und aus dem den Mitgliedern bei einer Heirat, einem Todesfall oder einer



Unter sengender Sonne auf der Suche nach dem einen großen Stein, der das Leben verändern soll: Diamantenschürfer in der Region Kono im Osten Sierra Leones.

Namenszeremonie für Kinder eine Unterstützung gezahlt wird. Nach dem Bürgerkrieg hatte die Regierung auf den illegalen Märkten zunächst viele Razzien durchgeführt. Dabei wurden auch Händler festgenommen. Die Illegalen unter ihnen haben sich damals an den Vorsitzenden der legalen Diamantenhändler gewandt. Dieser hat sich dann bei den Behörden dafür starkgemacht, dass die Razzien beendet werden.

Dass sich die Marktakteure gegenseitig unterstützen, hat etwas mit der Struktur der Handelsbeziehungen zu tun. Die meisten Diamanten, die im Land geschürft werden, sind sogenann-

te Mélée-Ware: Steine der kleinsten Kategorie. Wenn ein solcher Stein den Besitzer wechselt, dann wird dafür keine Einzelquittung ausgestellt. Das macht es leicht, geltende Regelungen zu umgehen. Hinzu kommt, dass viele Händler selbst Lizenzen zum Diamantenabbau haben. Sie können illegalen Diamantschürfern ihre Ware abkaufen und sie dann als eigene, legale Ware weiterverkaufen und sogar legal exportieren. Aus Sicht des Staates ist dies immer noch besser, als wenn die Diamanten geschmuggelt würden.

Davon abgesehen, gibt es in Sierra Leone kein staatliches Wohlfahrtssys-

tem. Viele junge Männer, die ansonsten möglicherweise ein Unruheherd wären, finden in den illegalen Marktsektoren Arbeit. Daher sind diese funktionierenden Handelsverflechtungen auch aus Sicht der Behörden durchaus ein Grund, ein gewisses Maß an Illegalität zu tolerieren. Natürlich ist der illegale Diamantenhandel auch für kriminelle Organisationen interessant. Aber deren Existenz ist in Friedenszeiten nicht so folgenschwer, wie sie es in den Kriegsjahren war. Außerdem finanzieren sich kriminelle Organisationen aus sehr vielen verschiedenen Quellen – nicht nur durch Diamanten. ▶



Töten für den Lifestyle

Annette Hübschle / Protokoll: Ralf Grötker

In Südafrika werden jeden Tag drei Nashörner getötet, ihr Horn auf dem internationalen Markt illegal verkauft. Der Krüger-Nationalpark sowie weitere öffentliche und private Wildgehege sind zu wahren Schlachtfeldern geworden, auf denen staatliche Sicherheitskräfte und Wildhüter für das Überleben der Rhinoceros kämpfen. Trotzdem wird es Schätzungen zufolge nur noch sieben Jahre dauern, bis sie ausgerottet sind. Die Zahl der gewilderten Tiere ist in zwei Jahren von 668 (2012) auf 1215 (2014) gestiegen. Doktorandin Annette Hübschle untersucht, warum der Schutz des Nashorns nicht gelingt.

Ich bin in Namibia aufgewachsen und hatte durch meine langjährige Rolle als wissenschaftliche Mitarbeiterin an einem südafrikanischen Forschungsinstitut im Forschungsbereich des organisierten Verbrechens Netzwerke aufgebaut, die bei der Datenerhebung äußerst wertvoll waren. Während meiner zwölf Monate Feldforschung im südlichen Afrika und in Südostasien habe ich mehr als 420 ethnografische Interviews und Diskussionen in Kleingruppen durchgeführt. Unter den Interviewten waren Wilde-

rer und deren Anführer – die meist aus Mosambik stammenden *kingpins* –, verurteilte Nashornjäger in südafrikanischen Gefängnissen, Nashornfarmer, Strafverfolger und Wildhüter, Vertreter von Dorfgemeinschaften, die in der Nähe des Krüger-Nationalparks auf der mosambikanischen Seite leben, von Naturschutzorganisationen und NGOs, Händler, Schmuggler und asiatische Konsumenten. Die hohe Zahl an Interviews und der Vergleich mit anderen qualitativen Daten wie etwa Polizeidokumenten und Gerichtsakten erleicht-

erten es, die Erkenntnisse zu verifizieren. Dies ist besonders wichtig, wenn illegale Märkte untersucht werden.

Mein Ziel war es, den Markt in seiner Gesamtheit zu verstehen und zu erfassen, angefangen bei der „Produktion“ – der Wilderei, der Jagd oder dem Diebstahl – bis hin zum grenzübergreifenden Produkttausch und Konsum des Rhinoceroshorns. Im Hinblick auf die Hindernisse, die Illegalität und Transnationalität bedeuten, stellt sich die Frage, wie die diversen Marktakteure Teil einer Gesellschaftsordnung werden



Der größte Fang in der EU-Geschichte: Polizeibeamte sichern für den asiatischen Markt bestimmte Rhinozeroshörner, die der tschechische Zoll im Sommer 2013 beschlagnahmen konnte. Die Ware hat einen Schwarzmarktwert von rund fünf Millionen US-Dollar. Die Polizei nahm 16 Mitglieder einer internationalen Bande fest, die des illegalen Trophäenhandels verdächtigt wird.

und die Koordinationsprobleme lösen, die Wettbewerb, Zusammenarbeit und Wertbildung an sie stellen.

Ein wichtiger Befund, der sich herausschält, ist, dass zentrale Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette das Verbot der Nashornwilderei schlichtweg nicht akzeptieren. Ich bezeichne dieses Phänomen als *contested illegality*, angezweifelte Illegalität, und es fungiert als eine Legitimationsstrategie für illegale wirtschaftliche Handlungsweisen. Das fängt bei den Wilderern an. Meist handelt es sich dabei um Menschen, die das ihnen angestammte Land und die damit verbundenen Jagdrechte durch koloniale Enteignung oder die Gründung von Nationalparks oder Wildschutzgebieten verloren haben. Dass sie die neu geschaffene Rechtsordnung und das Handelsverbot durch das Washingtoner Artenschutzübereinkommen (CITES) von 1973 – das auch noch unter dem alten Apartheidsregime etabliert wurde – nicht akzeptieren, liegt auf der Hand.

Die Wilderer sind jedoch oft nur die Fußsoldaten von professionellen Großwildjägern und Großwildfarmern, meist weißen Afrikanern, die über persönli-

che Netzwerke verfügen und Rhinozeroshorn bis nach Asien verkaufen. Unter ihnen gibt es viele, die eigenes Farmland oder Jagdreviere besitzen, aber auch Tierärzte und Hubschrauberpiloten. Auch diese Leute glauben, dass sie, moralisch betrachtet, auf der Seite des Rechts stehen. Die verbreitete Meinung unter ihnen ist, dass man das Nashorn nur effektiv schützen könne, wenn man Jagd und Verkauf des Horns erlaubt, um Anreize für die private Zucht zu schaffen, und wenn man der Staatskasse die für den Umwelt- und Artenschutz erforderlichen Geldmittel zuführt. Tatsächlich hat ein solcher Ansatz auf lokaler Ebene bislang jedoch wenig bewirkt – der landinterne Handel mit Rhinozeroshorn war bis 2009 in Südafrika erlaubt – und hat Schnittstellen zwischen legalen und illegalen Geschäften kreiert. Die prominente Rolle von Staatsakteuren in der Form von korrupten Aktivitäten ist nicht zu vernachlässigen, wie zum Beispiel Betrug bei CITES-Genehmigungen bis hin zur aktiven Teilnahme von Polizisten und Wildschützern in Wildereigruppen.

Bei den Endabnehmern schließlich scheint die Unrechtmäßigkeit so gut

wie keine Rolle zu spielen. Rhinozeroshorn gehört zu den teuersten Waren der Welt, ein Kilogramm kostet mehr als 50 000 Euro. Traditionell wird das pulverisierte Horn als Medizin verwendet. Es ist aber auch Statussymbol, Geschenk zur Vertiefung von Geschäftsverbindungen oder Investitionsobjekt. Wer Rhinozeroshorn als Wertanlage kauft, der setzt geradezu darauf, dass die Preise im Zuge des Aussterbens der Nashörner weiter steigen.

Viele der bisherigen politischen Maßnahmen haben in meinen Augen das Problem nur verschlimmert. Die Mobilisierung der Armee zum Schutz der Nashörner und die Erlaubnis für Wildschützer, die sich bedroht fühlen, Schusswaffen einzusetzen, haben dazu geführt, dass im vergangenen Jahr allein im Krüger-Nationalpark an die fünfzig Wilderer erschossen wurden – nicht gerade förderlich für die Akzeptanz von Schutzmaßnahmen für Nashörner. Es ist nicht verwunderlich, wenn die Lokalbevölkerung den Eindruck gewinnt, das Leben eines wilden Tieres werde höher bewertet als ihres.

Soziale Ungerechtigkeit und das koloniale Erbe begünstigen die Hinwen-

dung der Lokalbevölkerung zur Wilderei, bietet sie doch Möglichkeiten zur sozialen Mobilität, also zum Aufstieg in höhere sozioökonomische Positionen. Denn Wilderer bilden ihre eignen Jagdgruppen und vertreiben das Horn an Zwischenmänner oder asiatische Abnehmer. Zudem haben Dorfbewoh-

ner rund um den Krüger-Nationalpark nur wenige andere Möglichkeiten, ihren Lebensunterhalt zu verdienen. Im Zuge von Parkerweiterungen durch den Anschluss von Schutzgebieten in den Nachbarländern Mosambik und Simbabwe sind erst in der jüngsten Zeit erneut Dorfgemeinden umgesie-

delt worden. Was ich mir vorstellen könnte, wäre der Einsatz von Social Impact Bonds – Strukturhilfen und Investitionen für Landansprüche, Schulen und Krankenhäuser, die als Belohnung dafür gezahlt werden, dass die Dorfgemeinschaften den Kampf gegen die Wilderei unterstützen. ▲



Die große Chance

Matías Dewey / Protokoll: Ralf Grötke

La Salada, in einem Vorort von Buenos Aires gelegen, hat sich in den vergangenen Jahren zu einem bedeutenden Umschlagplatz für preiswerte Kleidung in Argentinien entwickelt. An mehr als 7800 Ständen verkaufen Händler T-Shirts, Jeans, Jacken, Schuhe, Unterwäsche und Kindermode, ein großer Teil sind Markenimitate. Vielen Standbetreibern gehören zugleich Sweatshops, in denen die Textilien entworfen, Stoffe gekauft und zugeschnitten werden. Matías Dewey hat erfahren, warum die Menschen hier durchaus zuversichtlich in die Zukunft blicken.

Mein Bruder arbeitet als Soziologe bei einer NGO, die Konfliktlösungsseminare für junge Frauen in Argentinien durchführt. Als zusätzlichen Anreiz für die Teilnahme an den Seminaren bietet die NGO Feldhockeykurse an. Weil ich früher einmal selbst professionell Hockey gespielt habe, war ich als Hockeylehrer im Einsatz. Dabei wurde ich darauf aufmerksam, dass die Eltern von vielen der jungen Frauen beruflich in La Salada tätig sind. So habe ich die ersten Kontakte für meine Feldforschung geknüpft.

In La Salada kommen verschiedene Aspekte von Illegalität zusammen. Ein Großteil der hier gehandelten Kleidung ist gefälschte Markenware. Außerdem besteht die Marktsiedlung aus nicht genehmigten Bauten. Und schließlich ist ein Großteil der in La Salada verrichteten Arbeit illegal in dem Sinne, dass die



Alle gängigen Sportschuhmarken im Sortiment – aber gefälscht. Fotografin Sarah Pabst begleitete die Feldforschung mit der Kamera und erkannte: La Salada ist eine Welt für sich.



Die tief stehende Sonne täuscht Idylle vor. Dabei ist die Umgebung von La Salada mit Müll übersät, der angrenzende Fluss Riachuelo stark verschmutzt. An Markttagen meiden öffentliche Nahverkehrsbusse das stark frequentierte Viertel.

Werkstätten dafür keine Steuern zahlen, die Regeln zur Arbeitssicherheit nicht beachtet werden und es keine geordneten Arbeitsverhältnisse gibt. Die Arbeiter in den Sweatshops haben zumeist einen Migrationshintergrund.

Was mich am meisten fasziniert hat, ist der Optimismus der Menschen, die in La Salada tätig sind. Die meisten von ihnen wissen, dass das, was sie tun, nicht völlig legal ist. Aber niemand hier hat die Absicht, Mafiaboss zu werden oder mit schwerer Kriminalität großes Geld zu verdienen. Sie selbst definieren ihre Tätigkeit vor allem als Arbeit – körperliche Arbeit, bei der oftmals erlernte Fähigkeiten zum Einsatz kommen. Eine Arbeit, das heißt auch: ein Einkommen und eine tägliche Routine. Viele Verkäufer haben zuvor als Straßenhändler gearbeitet, immer in informellen und extrem kurzfristigen Beschäftigungsverhältnissen. La Salada ist für sie der erste richtige Job. Auf einmal sehen sie eine

Zukunft für sich, können sich einen Fernseher und vielleicht ein Auto leisten, einen Internetzugang bezahlen. Ein Mann, den ich kennengelernt habe, hat früher als Getränkehändler gearbeitet. Jetzt ist er Karrenschieber in La Salada. In den letzten acht Jahren hat er fünfmal sein Auto gewechselt.

Obwohl der Staat als Ordnungsmacht in La Salada so gut wie überhaupt nicht präsent ist, kommt es erstaunlich selten zum Ausbruch von Gewalt. Vielleicht hat das aber auch einfach damit zu tun, dass wir es hier nicht mit schwerer, organisierter Kriminalität zu tun haben. Außerdem gibt es ein hohes Maß an „Gesetzestreue“ – wenn man das so sagen kann. Die Händler in La Salada zahlen nämlich Steuern. Nicht im gewöhnlichen Sinn: Sie bezahlen dafür, dass eigentliches Recht nicht durchgesetzt wird und sie ungestört ihren Handel treiben können. Dieses Geld landet teilweise tatsächlich in den Kassen des

Staates. Und dass jemand seinen informellen Zahlungspflichten nicht nachkommt, passiert nur selten. Dies hat paradoxerweise auch damit zu tun, dass es keine klaren Regeln gibt: Man weiß einfach nicht, welche Folgen einem drohen können, wenn man die Zahlung verweigern würde.

Obwohl La Salada illegal ist, stellt der Markt für alle Beteiligten eine Win-win-Situation dar. Die Händler haben ihr Auskommen, und die Kunden aus den unteren und mittleren Einkommensgruppen können sich in La Salada mit Kleidung versorgen – für legale Ware fehlt ihnen wegen der hohen Preise in Argentinien das Geld. Aus Sicht der Politik sind billige Kleidung und die Schaffung von Arbeitsplätzen ein willkommener Ersatz für Wohlfahrtsleistungen. Diese Dynamik stärkt nicht nur Marktbeziehungen, sondern auch klientelische Netzwerke und bestehende Machtverhältnisse. ▲



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

max-wissen.de



NEUER AUFTRITT VON WWW.MAX-WISSEN.DE



Unser Wissen von der Welt verändert sich ständig. Zum zehnjährigen Jubiläum hat www.max-wissen.de einen ganz neuen Auftritt bekommen. Neben den klassischen MAX-Heften finden sich dort neueste Informationen, Bilder und jetzt auch aufwendig produzierte Videos zu spannenden Themen aus der Forschung wie Pflanzenabwehr, Stammzellen, Klimawandel oder Biomaterialien.

WWW.MAX-WISSEN.DE

Der Schlossteich im Becherglas

Als nach dem Zweiten Weltkrieg der Waschmittelverbrauch stieg, gelangten jährlich Tausende Tonnen Phosphate in die Gewässer. Wie Bakterien und Algen darauf reagieren, untersuchte in den 1950er-Jahren **Hans Jürgen Overbeck**, später Direktor am **Max-Planck-Institut für Limnologie** in Plön. Entscheidende Hinweise lieferte ihm ein Teich im Park von Sanssouci in Potsdam.

TEXT ELKE MAIER

Für das Parkmanagement von Sanssouci war das Bassin auf der Gartenseite des Orangerieschlosses ein stetes Ärgernis: In dem zur Terrassenanlage gehörigen Wasserbecken schwamm eine dicke, grüne Algensuppe und verströmte einen Geruch, der so gar nicht zu der königlichen Umgebung passen wollte. Dabei wurde das Wasser in dem 1000 Quadratmeter großen, rund 70 Zentimeter tiefen Becken regelmäßig ausgetauscht. Einmal wöchentlich speiste eine Fontäne das Becken direkt aus der Havel. Das brachte jedoch keine Besserung – ganz im Gegenteil.

Wie viele Binnengewässer war auch die Havel seit den 1950er-Jahren übersättigt mit Nährstoffen, allen voran Phosphor. Ursache war vor allem der nach dem Krieg rapide gestiegene Verbrauch an Waschmitteln. Die darin als Enthärter enthaltenen Phosphate gelangten mit dem Abwasser direkt in Flüsse und Seen. Hinzu kam der großzügig ausgebrachte, phosphathaltige Kunstdünger, der von den Äckern und Wiesen direkt in die Gewässer gespült wurde und das Algenwachstum ankurbelte. So war die unappetitliche grüne Brühe vielerorts zu einem gewohnten Anblick geworden.

Dabei ist die Überdüngung der Gewässer – im Fachjargon Eutrophierung – längst nicht nur ein ästhetisches Problem: Nach ihrem Tod werden die Algenmassen von Myriaden von Bakterien zersetzt. Das verbraucht Sauerstoff, und im sauerstofffreien Tiefenwasser bilden sich Ammoniumionen, Methan und später auch giftige Stoffe wie Schwefelwasserstoff und Ammoniak. Kurz: Das Gewässer „kippt um“. Der Prozess verstärkt sich sogar noch selbst, denn bei Sauerstoffmangel geht auch das unlösliche Phosphat, das an Eisen gebunden im Gewässersediment abgelagert ist, wieder in Lösung und führt zu neuem Algenwachstum.

Auch wenn die Waschmittelindustrie den Zusammenhang leugnete, war bereits damals offensichtlich, dass die Eutrophierung unmittelbar mit dem Phosphateintrag zusammenhängt. Unklar war, welche biologischen und chemischen Prozesse dahinterstecken. Für einen ambitionierten jungen Wissenschaftler wie Hans Jürgen Overbeck bot das Wasserbassin im Schlosspark von Sanssouci daher ein vielversprechendes Forschungsgebiet.

Overbeck wurde im Jahr 1923 in Schwerin geboren, bekannt auch als die „Stadt der sieben Seen“. Als Jugendlicher war er von der

ursprünglichen Natur der mecklenburgischen Seenlandschaft und der Ostseeküste fasziniert. Im Jahr 1940 begann er in Rostock, Biologie und Chemie zu studieren. Mit dem Thema Phosphat kam er während seiner Tätigkeit an der Biologischen Forschungsanstalt Hiddensee in Berührung: In dem Projekt „Meeresdüngung“ ging es darum herauszufinden, ob sich mittels Phosphordüngung die Fischproduktion im Rügenschen Bodden steigern ließ.

Durch die Zugabe von Phosphat, so hoffte man, würde das Wachstum der Algen beschleunigt und damit eine reiche Nahrungsgrundlage für das Zooplankton geschaffen – kleine, freischwimmende Krebschen, die wiederum den Fischen als Nahrung dienen. „Mehr Phytoplankton = mehr Zooplankton = mehr Fische“, lautete daher die naheliegende Vermutung, die es zu überprüfen galt.

Schon bald mussten Overbeck und seine Mitstreiter jedoch erkennen, dass die Rechnung so einfach nicht aufging: „Überraschenderweise war die Sache mit dem Phosphor und der Nahrungskette viel komplizierter, als wir erwartet hatten“, schreibt Overbeck in seinem autobiografischen Roman *Insel der Kraniche*.

Zum einen hatten die Forscher die kleinsten Zellen als erstes Glied in der Kette übersehen. Zum anderen beeinflussten im Meerwasser gelöste Eisen- und Manganverbindungen die Verfügbarkeit des Phosphors ebenso wie Sauerstoff, Schwefelwasserstoff, Temperatur und Salzgehalt. „Große Überraschungen schon zu Beginn der Versuchsreihen, ein riesiges complexes Ökosystem“, so Overbecks Fazit.

Als der junge Wissenschaftler nach seiner Promotion eine Stelle am Botanischen Institut der Universität Potsdam antrat, bot das Wasserbecken im Schlosspark eine gute Gelegenheit, das „Phosphor-Problem“ an einem übersichtlicheren Forschungsobjekt wieder aufzugreifen, um grundlegende Fragen zu klären.

So war etwa rätselhaft, warum sich die Algen in dem Teich prächtig vermehrten, obwohl sich im Wasser fast kein gelöstes Phosphat nachweisen ließ – die einzige Form, in der Algen Phosphor aufnehmen können. Overbeck fand heraus, dass 90 Prozent des Phosphors in Biomasse und toter organischer Substanz gespeichert waren, eingebunden in komplizierte chemische Verbindungen. Wie aber konnten ihn die Algen dann überhaupt aufnehmen und verwerten?



Vom See ins Labor: Eine Mitarbeiterin Overbecks entnimmt eine Wasserprobe, um sie anschließend am Institut zu analysieren.

Ruderpartie im Dienst der Wissenschaft: Für seine Forschung war Hans Jürgen Overbeck oft auf dem Plußsee unterwegs.



Um das herauszufinden, machten sich Hans Jürgen Overbeck und seine Kollegen daran, die Algen aus dem Orangerieteich im Labor zu züchten. Wie an der charakteristischen Zellform unschwer zu erkennen, handelte es sich dabei hauptsächlich um Grünalgen der Art *Scenedesmus quadricauda*; darüber hinaus tummelten sich in dem Becken auch noch jede Menge Bakterien.

Um diese loszuwerden, filtrierten die Forscher die Proben zunächst und setzten anschließend in einer Nährlösung eine reine *Scenedesmus*-Kultur an. Zu ihrem Erstaunen bekam das den Algen jedoch gar nicht gut: Im keimfreien Wasser kümmerten sie dahin und stellten die Vermehrung ein. Erst als die Wissenschaftler wieder Bakterien zusetzten, begannen die Algen kräftig zu wachsen. Die Bakterien waren also offenbar für die Nährstoffversorgung der Algen wichtig.

Welche Rolle aber spielten sie dabei? Weitere Untersuchungen lieferten die Antwort. Sie ergaben, dass die Bakterien spezielle Enzyme – sogenannte Phosphatasen – ausscheiden. Diese lösen das Phosphat aus den organischen Verbindungen heraus, sodass die Algen den Phosphor aufnehmen können. Nachdem die Forscher die Phosphatasen in reiner Form isoliert hatten, machten sie die Probe

FRANKFURTER RUNDSCHEIN VOM 28. September 1981

» Der Plußsee ist so etwas wie ein Außenlabor der Plöner Binnengewässerkundler und das Lieblingsprojekt des Institutsleiters [...] Dort draußen im Wald will er [Overbeck] sein Credo umsetzen, mit dem er Erforschung von Natur betreibt: „Ein Ökosystem ist ein Verbund, und nur ein Verbund von Wissenschaftlern kann es erforschen.“«

auf Exempel. Sie versetzten eine bakterienfreie Algenlösung mit den Enzymen. Das Experiment glückte: Die Algen gediehen, selbst wenn der Phosphor lediglich in gebundener Form verfügbar war.

Hans Jürgen Overbeck hatte damit gezeigt, dass das Algenwachstum nicht von den aktuell im Wasser messbaren Phosphorkonzentrationen abhängt. Entscheidend ist vielmehr die rasante Umsetzung des gebundenen Phosphors. Selbst ein Gewässer von der Größe des Orangerieteichs ist damit ein höchst dynamisches System, das einem rasanten Kreislauf unterliegt. Später wiesen Overbeck und sein Kollege Hans-Dieter Babenzien auch noch andere Enzyme – Amylasen und Saccharasen – nach, die den Abbau von Kohlenhydraten steuern.

„Es stellte sich später heraus, dass dieses Prinzip der Vernetzung des Stoffwechsels verschiedener Organismen im Ökosystem mittels freier Enzyme allgemeingültig ist, nicht nur für aquatische, sondern auch für terrestrische Ökosysteme“, schreibt Overbeck in seinem Roman. Die Studien im Schlosspark von Sanssouci hatten damit nicht

nur dazu beigetragen, den Phosphatkreislauf aufzuklären, sondern auch ein fundamentales ökologisches Prinzip ans Licht gebracht.

Nach seinem Erfolg am Orangerieteich wandte sich Overbeck schon bald wieder einem „richtigen“ Gewässer zu: dem Plußsee nahe Plön in der Holsteinischen Schweiz. In der DDR hatten ihm nicht nur die fehlenden technischen Möglichkeiten und die Reisebeschränkungen, sondern auch die mangelnde Geistesfreiheit zu schaffen gemacht. Im Jahr 1961 – kurz vor dem Bau der Mauer – traten er und seine Familie daher den Weg in den Westen an.

Seine neue Wirkungsstätte war die Hydrobiologische Anstalt der Max-Planck-Gesellschaft in Plön. Hier machte sich der Forscher mit seinen umfangreichen Plußsee-Studien schon bald auch international einen Namen. Im Jahr 1966 – die Hydrobiologische Anstalt war in das Max-Planck-Institut für Limnologie umgewidmet worden – wurde er zum Direktor einer neuen Abteilung „Allgemeine Limnologie“ berufen.

Im Plußsee-Projekt ging es nicht nur darum, die komplizierten Stoffkreisläufe im See aufzuklären, sondern auch darum, die pflanzliche, bakterielle und tierische Produktion zu messen, die Populationsdynamik des Planktons zu studieren und Klimaeffekte aufzuklären. Daran waren Wissenschaftler ganz unterschiedlicher Fachrichtungen beteiligt. Sie betrieben Gewässerphysik, Chemie, Biochemie, Mikrobiologie, Planktologie, Zoologie und Paläontologie ebenso wie mathematische Modellierung. Heute gehört der kleine, idyllisch im Wald gelegene See zu den am besten untersuchten Seen weltweit.

Overbecks Steckenpferd aber blieben zeitlebens die Gewässerbakterien und die biochemischen Prozesse, die sie steuern. Der Wissenschaftler, der im März 2013 kurz vor seinem 90. Geburtstag starb, gilt damit als Wegbereiter der „Aquatischen Mikrobiellen Ökologie“. Typisch für ihn war, dass er den Umweltaspekt nie außer Acht ließ. So untersuchten er und seine Mitarbeiter etwa, welche mikrobiologischen Prozesse für die Produktion und den Verbrauch von Methan im Gewässer ursächlich sind. Die Studien lieferten damit wichtige Grundlagen für unser Verständnis, welche Rolle Methan beim Klimawandel spielt.

Overbecks Erkenntnisse zum Phosphatkreislauf flossen ein, als weltweit nach Wegen gesucht wurde, um die Gewässer eutrophierung zu bekämpfen. In den 1970er-Jahren erbaute das Max-Planck-Institut in Lütjenburg bei Plön eine der ersten deutschen Pilotanlagen einer sogenannten dritten oder chemischen Reinigungsstufe. Sie ermöglichte es, die Phosphate mit Eisensalzen auszufällen, und funktionierte bereits so gut, dass 90 Prozent des Phosphats entfernt wurden. Das Verfahren setzte sich durch: Heute verfügen Kläranlagen in Deutschland standardmäßig über eine mechanische, eine biologische und eine chemische Reinigungsstufe.

Neu erschienen



Shorty und seine Freunde

Alexander Pschera, **Das Internet der Tiere**, Der neue Dialog zwischen Mensch und Natur

186 Seiten, Verlag Matthes & Seitz, Berlin 2014, 19,90 Euro

Ziegen am Ätna, Saiga-Antilopen in Kasachstan, Störche und Haie: Wissenschaftler haben unzählige Tiere weltweit mit Funksendern ausgestattet. Diese werden immer kleiner und ermöglichen es, selbst die Flugrouten von Monarchfaltern zu verfolgen. Führt dies zu einer totalen Kontrolle im Tierreich? Braucht es einen Datenschutz für Tiere? Aus Sicht des Philosophen Alexander Pschera bietet die digitale Vernetzung zwischen Tier und Mensch neue Möglichkeiten des Tierschutzes, stellt Wissenschaftler aber auch vor ethische Fragen. Seine gewagte These: Neue Technologien können uns die Natur im Internetzeitalter wieder näherbringen und unser Naturbild verändern.

Ein gutes Beispiel hierfür ist der Waldrapp, eine seltene Zugvogelart, die fast vollständig ausgestorben war. In einem Modellprojekt wurden Vögel, die in Gefangenschaft gehalten wurden, wieder ausgewildert. Um ihnen das Zugverhalten neu anzutrainieren, begleiteten Piloten in Ultraleicht-Flugzeugen die Vögel auf ihren Flugrouten zwischen dem nördlichen Alpenvorland und der Toskana.

Mittlerweile fliegen die Vögel, die mit Sendern ausgestattet wurden, selbstständig über die Alpen. Diese Sender funken regelmäßig ihre Positionen. So können Wissenschaftler, aber auch Laien den Vogelzug im Internet und auf dem Smartphone verfolgen. Einzelne Individuen wie Shorty haben sogar ihre Fanseite auf Facebook. Vogelfreunde posten dort Bilder, sobald sie einen Wald rapp sichten. Darüber hinaus erweist sich die Rundum-Überwachung der seltenen Vögel als wirksamer Schutz vor Wilderei.

Max-Planck-Wissenschaftler Martin Wikelski geht noch einen Schritt weiter: Ihm treibt die Idee an, den sechsten Sinn der Tiere für den Menschen zu erschließen. Denn viele Tiere reagieren frühzeitig auf Anzeichen drohender Umweltkatastrophen. So zeigen etwa Ziegen, die am Ätna leben, bereits Stunden vor einem Ausbruch des Vulkans auffällige Bewegungsmuster (MAXPLANCKFORSCHUNG 1/2014, Seite 58 ff.). Vor dem Tsunami in Thailand flohen Elefanten ins Landesinnere. Und Fregattvögel in der Karibik erwiesen sich als hilfreiche Warner vor Wirbelstürmen.

„Wilde Tiere werden zu unseren Kumpaten, mit denen wir ebenso kommunizieren wie mit unserem Hund, Vogel oder der Katze“, schreibt Wikelski, Direktor des Max-Planck-Instituts für Ornithologie in Radolfzell, im Vorwort zu diesem Buch. „Der einzige Unterschied wird sein, dass diese wilden Tiere uns auch noch vor Katastrophen warnen, das Klima voraussagen und für uns die Luft-, Wasser- und Bodenchemie messen.“

Auch wenn die Nutzbarmachung des Natürlichen noch Zukunftsmusik ist, scheint die technologische Aufrüstung, die jetzt schon stattfindet, kritisch betrachtet für viele gleichbedeutend mit einer digitalen Rundum-Überwachung. „Wollen wir wirklich, dass sich die ganze Natur in ein einziges großes Datenlabor verwandelt, das den Menschen für Experimente zur Verfügung steht?“, fragt Alexander Pschera und formuliert drei neue Tierrechte. Demnach hat jedes Tierindividuum ein Recht darauf, eine Identität zu erhalten, ein Recht darauf, dass der Mensch es kennt und

schützt, und außerdem das Recht, in seiner jeweiligen Lebensumgebung optimale Bedingungen vorzufinden.

Ergänzend dazu müsse klar definiert sein, wie die Daten über Tiere gespeichert werden, wer sie sammeln und wer darauf zugreifen darf. Unter welchen Bedingungen und für welchen Zweck darf wer in das Leben der Tiere eingreifen? Wann ist eine solche Intervention nicht gerechtfertigt? Und wie viele Tiere müssen besendert werden, um repräsentative Aussagen über eine Art machen zu können?

Alexander Pscheras großes Verdienst ist es, diese kritischen Fragen zu stellen, auch wenn die Antworten, die er darauf gibt, leider vage bleiben. So anschaulich die Beispiele für das Internet der Tiere sind, so sehr hätte sich der Leser auch ausführliche ethische Forderungen und rechtliche Rahmenbedingungen erhofft. Dies ist jedoch nicht die Aufgabe des Autors, sondern primär der Wissenschaft, die ihre Forschung beständig hinterfragen sollte.

Unklar bleibt auch, wie sich eine zunehmende Grenzüberschreitung des Menschen auf eine fast unnahbar gewordene Natur auswirkt. Denn Naturschutz bedeutet heute vor allem Abstand. Wir sollen Reservate schützen, indem wir sie meiden. Alexander Pschera findet das paradox, weil wir durch diese Entfremdung genau jenen Kontakt verlieren, der uns eine Wertschätzung der Natur erst ermöglichen würde. Der neue Zugang zur Natur durch das Internet könnte genau diese Brücke wieder schlagen, hofft der Philosoph.

Barbara Abrell



Von Schellack und Skorpionskugeln

Mario Markus, **Unsere Welt ohne Insekten?** Ein Teil der Natur verschwindet

260 Seiten, Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart 2014, 19,99 Euro

Für verführerisches Lippenrot sorgt der Farbstoff E 120, auch bekannt als Cochenille oder Echtes Karmin. Er steckt in Kosmetika oder Lebensmitteln und war lange auch für die leuchtende Couleur von Campari verantwortlich. Seine Herkunft dürfte den meisten allerdings weniger appetitlich erscheinen – er wird aus getrockneten Läusen gemacht. Ein weiteres bekanntes Lausprodukt ist Schellack, der bis in die 1950er-Jahre als Material für Schallplatten diente. Heute noch findet er sich im Überzug von Schokoladekugeln oder von magensaftresistenten Medikamenten.

Die beiden Erzeugnisse sind nur zwei von vielen Beispielen dafür, wie die Welt der Insekten mit unserer verwoben ist. Trotzdem erfahren diese Tiere längst nicht die Beachtung und den Schutz, die sie verdienen. Das möchte Mario Markus ändern: Mit seinem neuen Buch will der vielseitige Forscher und Hobby-Entomologe das Augenmerk seiner Leserinnen und Leser auf die wenig beachtete Gruppe der Gliederfüßer – neben Insekten auch Spinnen, Krebsse und Tausendfüßer – lenken.

Mario Markus ist Physikprofessor und forschte am Dortmunder Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie. Sein Interesse an Insekten entdeckte der 1944 geborene Sohn deutscher Auswanderer bereits als Kind im heimischen Garten in Chile. Nun empfände er tiefen Schmerz darüber, dass sie dort und anderswo inzwischen verschwunden sind. „Am meisten kränkt mich aber, dass dies meinen Bekannten egal ist“, so schreibt der Autor in einem Interview am Ende des Buchs.

Zunächst präsentiert Markus in kurzen, in sich abgeschlossenen Kapiteln Wissenswertes und Kurioses aus der Welt der Gliederfüßer, die mehr als 60 Prozent aller bekannten Tierarten ausmachen. Eines davon handelt etwa von der Verwendung von Ameisen in der Chirurgie: Schon vor 3000 Jahren nutzte man die kräftigen Kiefer von Soldatenameisen als Heftklammern, um damit klaffende Wunden zu schließen. Als heilsam erwiesen sich auch die Maden der Goldfliege, die noch heute zur Wundbehandlung eingesetzt werden.

Weniger segensreich war hingegen der Einsatz von Insekten als biologischen Kriegswaffen: Bereits aus der Zeit um 300 vor Christus sind Seeschlachten bekannt, in denen Bienennester auf feindliche Schiffe katapultiert wurden. Ein mesopotamischer Herrscher ließ eigens mit Skorpionen gefüllte Tonkugeln anfertigen. Als „lebende Bomben“ wurden sie erfolgreich gegen die Römer eingesetzt.

Andere Kapitel erzählen davon, wie Insekten die Wissenschaft inspirieren. So ist etwa der in der Namib-Wüste beheimatete Nebeltrinker-Käfer *Onymacris unguicularis* Vorbild für künstliche „Nebelfänger“: Das Insekt stellt sich frühmorgens auf eine Sanddüne, um Wasser an seinem Körper kondensieren zu lassen. Dafür ist sein Panzer derart gestaltet, dass sich die winzigen Tröpfchen zu größeren Tropfen vereinen und direkt in den Käfermund rollen.

Mario Markus unterhält seine Leser aber nicht nur mit Geschichten, sondern weist auch auf die Bedrohungen hin, denen Insekten und ihre Verwandten aus-

gesetzt sind. Neben dem massenhaften Einsatz von Bioziden zählen dazu unter anderem Klimaveränderungen, Lichtverschmutzung, Überdüngung oder die Invasion gebietsfremder Arten. So hat etwa die südamerikanische Rote Feuerameise *Solenopsis invicta*, die um das Jahr 1930 in den USA eingeschleppt wurde, die Artenzahl von Gliederfüßern stellenweise um 75 Prozent reduziert. Nebenbei greift die Ameise sogar kleine Säugetiere an und zerstört Telefon- und Stromkabel.

Am Schluss geht der Autor auf mögliche Schutzmaßnahmen ein. Denn nur wenige Insekten seien tatsächlich schädlich, die allermeisten harmlos oder sogar nützlich. Wie sich ihr Verschwinden auf das ökologische Gesamtgefüge auswirkt, können Wissenschaftler kaum abschätzen.

Mario Markus‘ Buch ist kurzweilig, und die Geschichten lassen sich nicht nur chronologisch, sondern auch in beliebiger Reihenfolge lesen. Der Satz, dass sich die Männchen einer Falterart mit Geschlechtsgenossen „solidarisch“ zeigen, was „der Art zugutekommt“, dürfte bei Evolutionsbiologen wenig Zustimmung finden. Dafür liefert die Lektüre viele Argumente, um Insekten in Zukunft mit anderen Augen zu sehen. Der attraktiv gestaltete Bildteil zeigt die Schönheit und immense Vielfalt dieser Tiergruppe. Ein paar Tippfehler, die es ins Buch geschafft haben, fallen dagegen kaum ins Gewicht.

Elke Maier



Dem Nichts auf der Spur

Das Rätsel der Dunklen Materie

DVD, Laufzeit etwa 55 Minuten, Komplett-Media, Grünwald 2014, 19,95 Euro

Der Gedanke ist erschreckend: Mehr als 95 Prozent des Universums liegen in ewiger Dunkelheit. Ja sie sind nicht einfach nur unsichtbar, sondern bestehen aus einer uns vollkommen unbekannten Materie. Was aber steckt hinter diesem mysteriösen Stoff, der die Welt ebenso zusammenhält, wie er sie auseinandertreibt? Die DVD *Die Rätsel der Dunklen Materie* versucht, diesem größten Geheimnis der modernen Astrophysik auf die Spur zu kommen. Sie zeigt den aktuellen Forschungsstand und verdeutlicht, wie fragil unser wissenschaftliches Weltbild auch heute noch ist.

Es beginnt mit alltäglichen Bildern an einem Strand. Alles dort – Sand, Wasser, Menschen – besteht aus Atomen. Nur diese sogenannte Baryonische Materie nehmen wir wahr. Im All gibt es auch noch eine andere Art Materie. Fritz Zwicky fand in den 1930er-Jahren heraus, dass die sichtbare Masse längst nicht ausreicht, um einen Galaxienhaufen zusammenzuhalten. Und Vera Rubin vermaß in den Außenbezirken von Spiralgalaxien die Umlaufgeschwindigkeit von Sternen und entdeckte, dass diese mit zunehmender Entfernung vom Zentrum nicht etwa abnimmt, sondern nahezu gleich bleibt. Auch das ein deutlicher Hinweis auf einen unsichtbaren Stoff.

Der Film zeigt noch andere Werkzeuge, mit denen die Astrophysiker der Dunklen Materie nachjagen: Gravitationslinsen etwa, die durch eine große, nicht-sichtbare Masse wirken, den Raum verzerrn und die Strahlen ferner Objekte bündeln wie ein Brennglas. Auch mit dem 305-Meter-Radioteleskop auf Puerto Rico fahnden Wissenschaftler nach dem geheimnisvollen Stoff. Seine Spuren hat er schon auf dem „Babybild“ des Universums hinterlassen, auf einer Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung, die 380 000 Jahre nach dem Urknall auf die Reise ging.

Der Zuschauer begegnet Forschern wie David Spergel, der nach dem „Rezept“ für das frühe Universum sucht und ohne die Dunkle Materie als eine wichtige Zutat nicht auskommt. An dieser Stelle wird der Film sehr anschaulich, allerdings schleichen sich auch Fehler ein: Seit dem Urknall sind ungefähr 13,7 Milliarden Jahre vergangen (und nicht 13,7 Millionen); und die Zusammensetzung des jungen Kosmos mit „heißer Magma“ zu vergleichen ist ebenso falsch wie unsinnig.

Dennoch ist der Film im Ganzen sachlich korrekt und jederzeit spannend. Das gilt auch für den Teil über die aktive Suche nach der Dunklen Materie. Diese führt den

Zuschauer in Untergrundlaboratorien wie das unter dem Gran Sasso. Dort versuchen Forscher, mithilfe eines Xenon-Gas-Detektors die vermeintlichen Teilchen der Dunklen Materie, WIMPs genannt, dingfest zu machen – bisher ohne Erfolg. Ehrlicherweise spricht der Film diese Frustration der Forscher unumwunden an.

Man erfährt auch viel Wissenswertes über die enge Verbindung zwischen der Welt des ganz Großen und jener des extrem Kleinen. So etwa produzieren Wissenschaftler am europäischen Kernforschungszentrum CERN in ihren Detektoren Atlas und CMS ähnliche Bedingungen, wie sie beim Urknall herrschten. Und der Nobelpreisträger Samuel Ting sucht mit dem AMS-Experiment an Bord der *Internationalen Raumstation* nach den Teilchen der Dunklen Materie.

Zum Schluss beschreibt Saul Perlmutter, ebenfalls mit dem Nobelpreis ausgezeichnet, die Dunkle Energie, die das Weltall immer schneller auseinandertreibt und die „noch rätselhafter ist als die Dunkle Materie“ – zumal beide Stoffe gegeneinander wirken. So endet der Film mit der Erkenntnis, dass wir gegenwärtig wenig wissen. Die Zukunft hingegen verspricht interessant zu werden. Helmut Hornung

Weitere Empfehlungen

- Roland Full, **Vom Urknall zum Gummibärchen**, Ein Lese- und Experimentierbuch, Verlag Wiley-VCH, Weinheim 2014, 24,90 Euro
- Luc Semal, Yannick Fourié, **Bestiarium**, Zeugnisse ausgestorbener Tierarten, Haupt Verlag, Bern 2014, 39,90 Euro
- Norman Sieroka, **Philosophie der Physik**, Eine Einführung, Verlag C.H. Beck, München 2014, 8,95 Euro
- J. Craig Venter, **Leben aus dem Labor**, Die neue Welt der synthetischen Biologie, S. Fischer Verlag, Frankfurt/Main 2014, 19,99 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

Susanne Beer (Kultur, Gesellschaft; -1342)
Dr. Elke Maier (Biologie, Medizin; -1064)
Dr. Harald Rösch (Biologie, Medizin; -1756)

Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)

Gestaltung

Julia Kessler, Sandra Ostertag
Voßstraße 9
81543 München
Telefon: 089 27818770
E-Mail: projekte@designergold.de

Litho

kaltner verlagsmedien GmbH
Dr.-Robert-Zoller-Straße 1
86399 Bobingen

Druck & Vertrieb

Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg

Anzeigenleitung

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

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

Die **Max-Planck-Gesellschaft** zur Förderung der Wissenschaften unterhält 83 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 21 600 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 5500 fest angestellte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2014 umfasst insgesamt 1,6 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
jetzt als ePaper: www.mpg.de/mpf-mobil

Kostenlos
downloaden!



Internet: www.mpg.de/mpforschung



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT