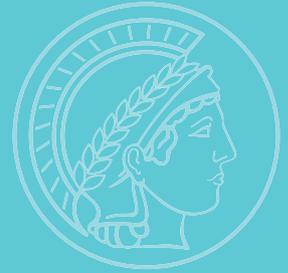


Max Planck FORSCHUNG



Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft **I.2016**



Sprache

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE
Die Wahrheit
im Blatt

ASTRONOMIE
Eine dunkle Welt
aus Eis

UMWELT
Tauwetter im
Klimarechner

Spezial
Gravitationswellen

The background of the cover is a stylized, blue-toned illustration of a futuristic industrial or research environment. On the left, a large, curved structure, possibly a tunnel or a large machine component, is shown in cross-section. In the center and right, several figures in business attire are engaged in various activities: one person stands looking at a tablet, another stands near a wall with multiple data screens, and two others are seated in the foreground, one looking towards the camera. The overall aesthetic is clean, modern, and technological.

SIEMENS

Pictures of the Future

Das Magazin für Forschung und Innovation

Dossier – Innovationen bei Siemens

Von der ersten Idee bis zur Markteinführung:
Wie Innovationen entstehen.

[siemens.de/pof-innovationen](https://www.siemens.de/pof-innovationen)



Über den Wolken?

Nein, mittendrin zu sein ist hier das Ziel! Denn sowohl das globale Klimageschehen als auch lokale Wetterereignisse hängen massiv von der Wolkenbildung ab. In exponierter Lage, knapp unter dem Gipfel der Zugspitze und sehr oft in dichte Wolken gehüllt, bietet das Schneefernerhaus den Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation perfekte Bedingungen, Wolken ganz direkt und unmittelbar zu untersuchen. Bis Anfang der 1990er-Jahre ein Hotel, beherbergt es heute die höchstgelegene Forschungsstation Deutschlands. Die Göttinger Forscher wollen dort messen, wie in den turbulenten Strömungen einer Wolke kleinste Wassertröpfchen aufeinanderprallen, sich zu größeren Tröpfchen verbinden und schließlich Regen bilden. Denn gerade diese Phase des Tröpfchenwachstums lässt sich nur schlecht unter Laborbedingungen reproduzieren oder numerisch simulieren.

6,5 Tonnen Equipment wurden nach vierjähriger Vorbereitungszeit mit einem Schwerlasttransporter von Göttingen nach Garmisch-Partenkirchen gebracht und mithilfe eines Spezialhelikopters auf der Turmterrasse des Schneefernerhauses installiert. Das Herzstück der Messkonstruktion ist die „Wippe“. Auf ihr kann ein Schlitten im Hauptstrom einer vorbeiziehenden Wolke sozusagen mitfahren. Vier Hochgeschwindigkeitskameras fotografieren dabei die mit einem starken Laser angestrahlten Wolkenpartikel. So ist es möglich, den Weg einzelner Tröpfchen über ein relativ langes Zeitintervall zu verfolgen.

Im Hochdruckwindkanal im Göttinger Labor können die Wissenschaftler turbulente Strömungen fast jeglicher Art modellhaft erzeugen, auf der Zugspitze natürliche Turbulenzen sehr genau beobachten. Beides zusammen soll das Geheimnis der Wolken entschlüsseln – für ein besseres Verständnis dieser für das Klima so wichtigen nebulösen Schönheiten.

 <https://www.youtube.com/watch?v=LqldF5UpdOQ>



18 SPRACHE

18 Ohne Worte

Der Mensch braucht Gesten, um sprechen zu lernen. Aber waren Gesten in der Evolution ein Vorläufer der menschlichen Sprache? Um diese Frage zu klären, untersucht Simone Pika vom Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen die Kommunikation von Menschenaffen, Rabenvögeln – und Babys.

26 Erst reden, dann denken

In normalen Unterhaltungen beginnen wir oft zu sprechen, bevor wir genau festgelegt haben, was wir sagen wollen. Antje Meyer und ihr Team am Max-Planck-Institut für Psycholinguistik in Nijmegen gehen der Frage nach, wie wir Aussagen planen und welche Hindernisse es dabei geben kann.

34 Der digitale Bildreporter

Die Hörfassung eines Films lässt Blinde die Handlung verstehen. Könnte nicht ein Computer diese Übersetzungsarbeit leisten? Anna Rohrbach, Wissenschaftlerin am Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken, und ihr Mann Marcus Rohrbach arbeiten genau daran. In Zukunft soll ein Rechner automatisch Filmbeschreibungen generieren und vorlesen.

ZUM TITEL Auch wenn wir manchmal aneinander vorbeireden: Sprache ist das wichtigste Mittel der Kommunikation. Wie aber hat sich dieses Instrument im Lauf der Evolution entwickelt? Und was geht in unseren Köpfen vor, wenn wir eine Unterhaltung führen? Sprache erweist sich als ein außergewöhnlich komplexes Thema – und ist nicht nur für klassische Sprachwissenschaftler und Informatiker interessant, sondern auch für Psychologen und Verhaltensforscher.

Inhalt



48

Gesuchte Materialien: Forscher erproben neue Verbindungen, etwa für Dauermagnete.

PERSPEKTIVEN

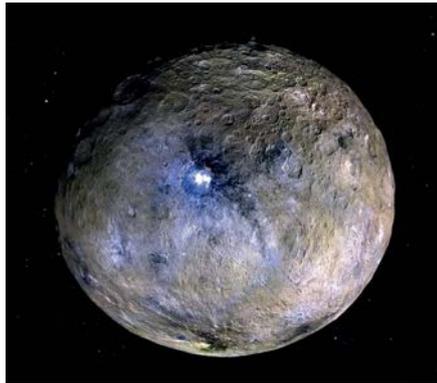
- 06 Kanzlerin am roten Knopf
- 06 Neues Netzwerk für Alumni
- 07 „Entscheidend ist das Endprodukt“
- 08 Leibniz-Preise an drei Max-Planck-Forscher
- 08 HIV-Schere gegen Aids
- 09 Talentaustausch mit niederländischer Universität
- 09 Ins Netz gegangen

ZUR SACHE

- 10 **Die Wahrheit im Blatt**
Objektivität gilt als eines der höchsten Ideale der Forschung. Doch erst im 19. Jahrhundert trat sie in Konkurrenz zu dem jahrhundertealten Grundsatz der Naturwahrheit. Noch heute geraten beide Leitbilder in Konflikt.

FOKUS

- 18 Ohne Worte
- 26 Erst reden, dann denken
- 34 Der digitale Bildreporter



56 Gelungene Aufnahmen: Bilder aus Spezialkameras lüften die Geheimnisse von Zwergplanet Ceres.



62 Geschrunppte Polkappe: Messungen in der Arktis erklären das rasche Abschmelzen des Meereises.



70 Gefragte Analysen: Ayelet Shachar erforscht die rechtlichen Aspekte der Flüchtlingskrise.



BIOMAX

Gefiederte Großstädter – und ihr anderes Verhalten (nicht nur zur Paarungszeit)

SPEKTRUM

- 42** Energieschleuder im Herzen der Milchstraße
- 42** Bluttest für Tuberkulose
- 43** Kompass im Auge
- 43** Erpresser am Verhandlungstisch
- 44** Animieren leicht gemacht
- 44** Eine Hammer-Tauschaktion
- 45** Kuschneln gegen den Schmerz
- 45** Elektronen im Reaktionstest
- 45** Immungene vom Neandertaler
- 46** Die dunkle Taiga lichtet sich
- 46** Planetengeburt im Eiltempo
- 47** Wimpertierchen als Vorbild
- 47** Not macht Senioren risikobereiter
- 47** Kampf um den Wirt

MATERIAL & TECHNIK

- 48** **Trio mit großem Repertoire**
Technischer Fortschritt wird oft erst durch neue Materialien möglich, sei es in der Energieversorgung oder in der Informationstechnologie. Die Heusler-Verbindungen sind eine Fundgrube für Stoffe.

PHYSIK & ASTRONOMIE

- 56** **Eine dunkle Welt aus Eis**
Erstmals erreichte eine Raumsonde die Ceres. Mit den beiden Kameras an Bord erkunden Wissenschaftler die Oberfläche des Zwergplaneten. Wassereis haben sie schon entdeckt. Aber ruht tief unter den Kratern auch noch ein Ozean?

UMWELT & KLIMA

- 62** **Tauwetter im Klimarechner**
Nirgendwo macht sich der Klimawandel so deutlich bemerkbar wie in der Arktis. Die Menge des Meereises hat hier in den vergangenen Jahrzehnten drastisch abgenommen. Welche Prozesse beeinflussen die Bildung und das Schmelzen des Eises?

KULTUR & GESELLSCHAFT

- 70** **Mittlerin zwischen den Welten**
Zur Person: Ayelet Shachar

RUBRIKEN

- 03** **Orte der Forschung**
- 16** **Post nach - Kalkutta, Indien**
Bildung ist ein hohes Gut
- 88** **Neu erschienen**
Ulrich Schnabel, Was kostet ein Lächeln?
- 89** Tim Birkhead, Die Sinne der Vögel
- 90** Rüdiger Vaas, Jenseits von Einsteins Universum
- 91** **Standorte**
- 91** **Impressum**

Gravitationswellen

- 78** **Überblick**
Der Kosmos bebt
- 82** **Interview**
„Das Signal stach sofort ins Auge“
- 86** **Rückblende**
Die Suche nach dem zarten Zittern

SPEZIAL

Kanzlerin am roten Knopf

Hoher Besuch im Kontrollraum der Kernfusionsanlage Wendelstein 7-X: Kanzlerin Angela Merkel, die ja selbst Physikerin ist, kam Anfang Februar nach Greifswald, um das erste Wasserstoffplasma in der Fusionsanlage zu starten. „Jeder Schritt, den wir auf dem Jahrhundertweg Richtung Fusionskraftwerk vorankommen, ist ein Erfolg“, betonte Merkel vor den zahlreichen Gästen aus Wissenschaft und Politik, bevor sie zur Tat schritt. Für den entscheidenden Knopfdruck hatten die Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik eigens einen Glasquader mit der Silhouette der Fusionsanlage anfertigen lassen und auf einer Stahlsäule platziert. Als Angela Merkel dann beherzt den Knopf drückte, flackerte kurze Zeit später ein helles Leuchten über die Bildschirme, die einen Blick ins Innere des Plasmagefäßes erlaubten. Zu sehen war die kurze Fusionsreaktion, welche die Kanzlerin per 2-Megawatt-Puls der Mikrowellenheizung in Gang gesetzt hatte. Mit einer Temperatur von 80 Millionen Grad und einer Dauer von einer Viertelsekunde erfüllte das erste Wasserstoffplasma in der Maschine die Erwartungen der Wissenschaftler und Techniker am Institut vollständig.



Vor dem Start: Projektleiter Thomas Klinger, die Geschäftsführende Direktorin Sibylle Günter, Helmholtz-Präsident Otmar Wiestler, Kanzlerin Angela Merkel, Max-Planck-Präsident Martin Stratmann und Mecklenburg-Vorpommerns Ministerpräsident Erwin Sellering (von links).

Neues Netzwerk für Alumni

Ehemalige Max-Plancker schließen sich zusammen

Jährlich kommen Wissenschaftler aus den verschiedensten Ländern an Max-Planck-Institute, umgekehrt gehen viele als Alumni in alle Welt. Die Max-Planck-Gesellschaft engagiert sich seit geraumer Zeit dafür, gemeinsam mit ihnen ein weltweites, fachübergreifendes Netzwerk aufzubauen. Bisher lag der Schwerpunkt der Alumniarbeit an den ehemaligen Wirkungsorten. „Max-Planck-Alumni fühlen sich in erster Linie mit ihrem Institut verbunden“, sagt Filippo Guarnieri, der früher am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik tätig war. Aber er betont auch: „Ihre

Kompetenzen sind für die gesamte Max-Planck-Gesellschaft von Bedeutung – über die Institutsgrenzen hinaus.“

Grund genug für ihn und fünf weitere Alumni aus verschiedenen Instituten, die Max Planck Alumni Association e.V. ins Leben zu rufen. Die neue Vereinigung soll es allen Alumni ermöglichen, sich in eigenständigen Projekten selbstverantwortlich und zum Wohl der gesamten Organisation und ihrer Wissenschaftler zu engagieren – beispielsweise für Wissensaustausch, Karriereentwicklung oder Rekrutierung.

„Entscheidend ist das Endprodukt“

Detlef Weigel, Direktor am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie, über Genom-Editierung als Möglichkeit, gezielt bessere Nutzpflanzen zu züchten



Detlef Weigel

Widerstandsfähiger gegen Schädlinge, unempfindlicher gegen Trockenheit, höhere Erträge – das ist nur eine kleine Auswahl der Anforderungen, die Nutzpflanzen in Zukunft erfüllen müssen. Die Menschheit braucht neue Kulturpflanzen, die den Veränderungen durch den Klimawandel widerstehen und den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln befriedigen können. Mit einer neuen Methode, der sogenannten Genom-Editierung, wollen Wissenschaftler künftig effizienter als bisher neue Sorten entwickeln. Wenn keine artfremden Gene eingefügt wurden, sind diese Pflanzen nicht von Pflanzen zu unterscheiden, die auf herkömmliche Weise gezüchtet wurden. Detlef Weigel vom Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen fordert deshalb zusammen mit Kollegen aus den USA und China, solche Genom-editierten Sorten nicht als gentechnisch verändert einzustufen.

Herr Weigel, wie werden heute neue Sorten von Nutzpflanzen gezüchtet?

Detlef Weigel: Es ist wichtig zu wissen, dass es auch bei der herkömmlichen Zucht das Ziel ist, das Erbgut der Pflanzen zu verändern. Wenn man etwa eine neue Pflanze haben möchte, die sowohl Trockenheit aushält als auch hohe Erträge bringt, kann man vorhandene Sorten miteinander kreuzen, die widerstandsfähig gegen Trockenheit oder besonders ertragreich sind. Im Erbgut der Nachkommen werden die Gene dafür neu gemischt. Einige wenige Pflanzen erhalten die Gene für beide Eigenschaften. Man kann auch chemische Substanzen oder Strahlung einsetzen, die irgendwo Mutationen im Erbgut erzeugen. Auf diese Weise können ebenfalls Pflanzen mit neuen Eigenschaften entstehen. Es ist allerdings sehr langwierig und aufwendig, aus Tausenden von Mutanten die Pflanzen mit den gewünschten Eigenschaften herauszusuchen.

Was ist der Unterschied zwischen Genom-editierten und gentechnisch veränderten Pflanzen? Bei der klassischen Gentechnik werden oft Gene ins Erbgut einer Pflanze eingebracht, die natürlicherweise nicht in dieser Art vorkommen, etwa Resistenzgene gegen ein Herbizid. Dafür gibt es unterschiedli-

che Verfahren. Die Gene können mit einer Art Genpistole in die Pflanzenzellen „geschossen“ werden. Bei der Genom-Editierung schneiden wir das Erbgut mit einem Protein an einer vorbestimmten Stelle. Die landläufigste Methode ist inzwischen diejenige, die als CRISPR/Cas9 bekannt ist. An der Schnittstelle können wir nun das Erbgut verändern oder neue Abschnitte einfügen. Die Genom-Editierung sollte deshalb als eine Variante der Mutationszüchtung betrachtet werden, mit dem Unterschied, dass Mutationen gezielt erzeugt werden.

Der große Vorteil ist, dass dieselbe Art von Veränderungen möglich ist, wie sie bei herkömmlichen Zucht- und Kreuzungsexperimenten vorgenommen werden. So lassen sich etwa einzelne Buchstaben des genetischen Codes austauschen. Dies entspricht einer Veränderung, die auch durch natürliche Mutationen entsteht. Es lassen sich auch kurze DNA-Abschnitte einfügen und so Gene einer Art durch Gene anderer Sorten oder nah verwandter Arten ersetzen – etwas, das bei traditionellen Kreuzungen ebenfalls gemacht wird.

Die Kritik an gentechnisch veränderten Pflanzen entzündet sich ja besonders an den angesprochenen Fremdgenen. Enthalten Genom-editierte Pflanzen ebenfalls solche Fremd-DNA?

In der Regel wird die Erbinformation für das Schneideprotein ins Erbgut der Pflanze eingebaut, damit es in den Pflanzenzellen gebildet werden kann. Dieses Gen kommt natürlicherweise nicht in Pflanzen vor, das ist also Fremd-DNA. Nach erfolgter Veränderung des Genoms kann diese jedoch wieder vollständig entfernt werden. Es lässt sich mit den heutigen Analysemethoden sicherstellen, dass eine Genom-editierte Pflanze keinerlei Fremd-DNA mehr enthält. Man kann mit der Genom-Editierung auch gezielt völlig artfremde Gene in das Genom einfügen, ähnlich wie mit der klassischen Gentechnik. Dieser Typus von Genom-Editierung sollte jedoch anders reguliert werden als die kleinen Veränderungen.

Lassen sich dann Genom-editierte und klassisch gezüchtete Pflanzen überhaupt unterscheiden?

Wenn keine fremden Gene eingefügt wurden, nicht! Eine mittels Genom-Editierung veränderte Pflanze unterscheidet sich dann durch nichts von Pflanzen, deren Erbgut durch Züchtung verändert wurde. Am Ende erinnert nichts mehr daran, wie die neue Sorte entstanden ist.

Man müsste Genom-editierte Pflanzen also nicht wie gentechnisch veränderte Pflanzen behandeln, wenn sie keine Fremd-DNA enthalten?

Genau! Deshalb fordern wir auch, sie wie herkömmlich gezüchtete Pflanzen einzustufen. Unserer Ansicht nach spielt es keine Rolle, wie eine Pflanzensorte entstanden ist, nur das Endprodukt als solches zählt. Ich finde, es widerspricht dem gesunden Menschenverstand, Pflanzen, von denen man im Nachhinein gar nicht mehr sagen kann, wie sie entstanden sind, unterschiedlich zu kennzeichnen.

Ist das rechtlich möglich, oder ist dazu eine Gesetzesänderung notwendig?

Das deutsche Gentechnik-Gesetz besagt, dass Nachkommen einer gentechnisch veränderten Pflanze automatisch ebenfalls als gentechnisch verändert gelten. Die Tatsache, dass Genom-editierte Pflanzen vorübergehend das Gen des Schneideproteins enthalten haben, würde sie und ihre Nachkommen für alle Zeiten zu gentechnisch veränderten Pflanzen machen – und das, obwohl das Fremdgen wieder restlos entfernt worden ist. Das war sicherlich nicht im Sinne des Gesetzgebers, denn bei der Verabschiedung des Gentechnik-Gesetzes gab es die Genom-Editierung noch nicht. Unser Vorschlag lautet deshalb, das Gentechnik-Gesetz auf Genom-editierte Pflanzen nicht anzuwenden. Interview: Harald Rösch

Leibniz-Preise an drei Max-Planck-Forscher

Wichtige Auszeichnung für Marina Rodnina, Emmanuelle Charpentier und Benjamin List

Er gilt als einer der renommiertesten Wissenschaftspreise in Deutschland: der Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis, den die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) jährlich verleiht. Den mit bis zu 2,5 Millionen Euro dotierten Preis konnten im März 2016 erneut drei Max-Planck-Direktoren entgegennehmen.

Marina Rodnina vom Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie wurde für ihre wegweisenden Beiträge zum Verständnis der Funktion von Ribosomen ausgezeichnet. Ihr ist es gelungen, zentrale Prinzipien der Funktionsweise von Ribosomen – den Proteinfabriken lebender Zellen – aufzuklären. Emmanuelle Charpentier, Direktorin am Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie, erhielt den Preis für die Entwicklung der CRISPR/Cas9-



Besondere Ehre: Zu den Gewinnern der diesjährigen Leibniz-Preise gehören die Max-Planck-Direktoren Marina Rodnina, Emmanuelle Charpentier und Benjamin List.

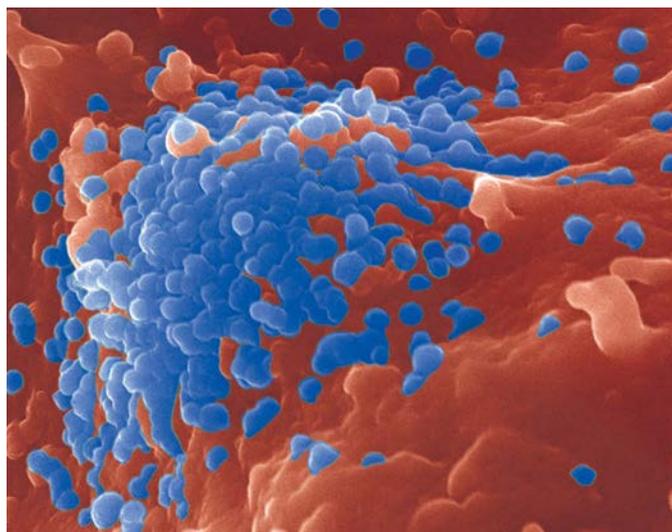
Methode. Dieser von Bakterien stammende Mechanismus lässt sich als extrem präzises Werkzeug einsetzen, um die Funktion von Genen zu untersuchen und genetisches Material zu bearbeiten. Benjamin List, Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenfor-

schung, wurde für die Begründung eines neuen Feldes der Katalyseforschung geehrt. List hat eine der Grundlagen für die Organokatalyse entdeckt, wodurch sich Naturstoffe anstelle von Metallen als Katalysatoren einsetzen lassen.

HIV-Schere gegen Aids

Enzym entfernt das Erbgut des Aids-Erregers aus infizierten Zellen

Eine HIV-Infektion lässt sich bisher nicht heilen. Die Medikamente, die Infizierte lebenslang einnehmen müssen, unterdrücken nur die Vermehrung des Virus und damit den Aus-



bruch der Krankheit. Im Jahr 2007 gelang es Forschern um Joachim Hauber vom Heinrich-Pette-Institut in Hamburg und Frank Buchholz vom Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik in Dresden erstmals, das HIV-Erbmaterial mithilfe eines Enzyms aus menschlichen Zellkulturen herauszuschneiden. Nun haben die Wissenschaftler einen wichtigen Schritt nach vorn gemacht: Sie entwickelten die Genschere so weiter, dass mehr als 90 Prozent des HIV-Genoms aus dem menschlichen Genom entfernt werden können.

In der Zellkultur und im Tierversuch haben die Forscher die Wirksamkeit ihrer Methode nachgewiesen: Bei Tieren, die damit behandelt wurden, sank die Zahl der Viren unter die Nachweisgrenze. Für Frank Buchholz, mittlerweile Professor an der Technischen Universität Dresden, ein medizinischer Meilenstein: „Das Generieren von molekularen Skalpellern wird die Medizin verändern. Von dieser Entwicklung werden nicht nur HIV-Patienten, sondern auch viele andere Patienten mit genetisch bedingten Erkrankungen profitieren.“

Knospende HI-Viren: Aus aktivierten T-Zellen werden pro Tag bis zu zehn Milliarden Virionen neu gebildet. Nach kurzer Zeit sind diese Viruspartikel bereit, die nächsten Zellen zu infizieren.

Talentaustausch mit niederländischer Universität

Max-Planck-Gesellschaft und Radboud-Universität vereinbaren gemeinsame Programme

Jedes Jahr können künftig bis zu 100 Masterstudenten der niederländischen Radboud-Universität Praktika an Max-Planck-Instituten absolvieren. Ein entsprechendes Abkommen schlossen Universitätspräsident Gerard Meijer und Max-Planck-Präsident Martin Stratmann Anfang März. „Das ist eine großartige Möglichkeit für uns, Kontakt zu jungen Talenten zu knüpfen“, betonte Stratmann bei der Unterzeichnung. Meijer hob die Chancen für die Studierenden hervor, Forschungserfahrung an einem der renommierten Max-Planck-Institute zu sammeln.

Die Praktika sollen sechs bis zwölf Monate dauern, die beteiligten Institute stellen Betreuung, Arbeitsplatz und Arbeitsmaterialien zur Verfügung. Die übrigen Kosten werden von der Radboud-Universität und dem Erasmus-Programm übernommen. Eine weitere Rahmenvereinbarung zwischen den beiden Wissenschaftsinstitutionen ermöglicht darüber hinaus Max-Planck-Wissenschaftlern, Lehrerfahrung an der Radboud-Universität zu sammeln. Davon können gerade junge Forscher profitieren, die eine Universitätskarriere anstreben. Auch die Kooperationen im Bereich der Forschung sollen ausgebaut werden. Die Zusammenarbeit ist zunächst auf fünf Jahre angelegt.



Gute Zusammenarbeit: Max-Planck-Präsident Martin Stratmann (links) und Universitätspräsident Gerard Meijer besiegeln mit ihren Unterschriften den Beginn neuer gemeinsamer Aktivitäten der beiden Institutionen.

Ins Netz gegangen



Eisige Tiefsee

Die Meeresbiologin Antje Boetius und ihr Team waren mit dem größten deutschen Forschungseisbrecher *Polarstern* am Polarkreis unterwegs, um dort am Meeresgrund sogenannte Schwarze Raucher – hydrothermale Quellen – zu finden. Unterstützt wurde ihre Expedition durch einen Roboter, der sich unter dem Eis bewegen lässt und der faszinierende Bilder an die Oberfläche sandte. Wer die Dokumentation über die Wissenschaftlerin verpasst hat, kann sich den 43-Minuten-Beitrag in der Arte-Mediathek ansehen und in die Höhen und Tiefen der Expedition eintauchen. www.arte.tv/guide/de/055217-001-A/frauen-und-ozeane

Ein Quantum Zukunft

Wissenschaftler wollen die Quantenkommunikation abhörsicher machen. So kann der Empfänger einer Nachricht etwa feststellen, ob eine Übertragung abgehört wurde. Möglich macht dies die Unscharferelation, die Werner Heisenberg bereits im Jahr 1927 beschrieb. Was sich hinter dieser Gesetzmäßigkeit verbirgt und wie diese für einen Kopierschutz genutzt wird, erklärt einfach und verständlich unser neues Schulvideo für die gymnasiale Oberstufe. www.youtube.com/maxplancksociety

Faszinierende Einblicke

Am 15. März wurden die Wellcome Image Awards für die besten Wissenschaftsfotos des Jahres im biologisch-medizinischen Bereich vergeben. 20 spektakuläre Bilder wurden ausgezeichnet, darunter auch eine Einreichung von Alfred Anwander vom Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig. Wellcome Image ist eine umfangreiche Bilddatenbank, die unbeschränkt Zugriff auf Fotos und Illustrationen von der Medizingeschichte bis zur aktuellen biomedizinischen Forschung ermöglicht. Alljährlich kürt ein Team aus Wissenschaftlern, Künstlern und Journalisten die besten Wissenschaftsfotos. www.wellcomeimageawards.org/2016/

Die Wahrheit **im Blatt**

Objektivität gilt als eines der höchsten Ideale der Forschung. Doch das war nicht immer so. Erst im 19. Jahrhundert trat sie in Konkurrenz zu dem jahrhundertealten Grundsatz der Naturwahrheit. Und noch heute geraten die beiden Leitbilder in Konflikt. Wie unsere Autorin darlegt, lässt sich manche wissenschaftliche Kontroverse besser verstehen, wenn man sich mit der Geschichte der Naturwissenschaften etwas genauer befasst.

TEXT **LORRAINE DASTON**

Wozu braucht die Gesellschaft die Wissenschaftsgeschichte? Und wozu braucht speziell die Wissenschaft die Wissenschaftsgeschichte? In der hochdruckbeschleunigten Welt der heutigen Forschung wünschen sich Wissenschaftler oftmals etwas, das die Wissenschaftsgeschichte *nicht*

Die Wissenschaft hat
unterschiedliche Zeitskalen,
jede mit eigenem Tempo

liefern kann: Aussagen über den nächsten Durchbruch und darüber, welches Forschungsprogramm seine Versprechungen und noch mehr erfüllen wird. Solche Prophezeiungen sind nicht möglich – zum Glück. Eine Wissenschaft, deren Zukunft sich anhand ihrer Vergangenheit extrapolieren ließe, wäre nicht kreativ.

Was die Wissenschaftsgeschichte zur Wissenschaft beitragen kann, ist eine Erklärung, warum die gegenwärtige Forschung sich diesen Themen (und nicht anderen) widmet; warum diese Methoden (und nicht andere) unentbehrlich geworden sind; warum manche Entdeckungen sofort gefeiert werden, andere dagegen Jahrzehnte, wenn nicht Jahrhunderte in Vergessenheit geraten sind; warum eine Disziplin floriert und eine andere vernachlässigt wird; warum eine wissenschaftliche Karriere diese Etappen (und nicht andere) hat; schließlich, warum es überhaupt wissenschaftliche Karrieren gibt – historisch gesehen, alles andere als eine Selbstverständlichkeit.

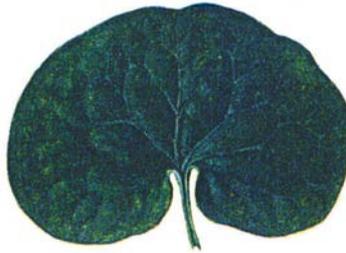
Vor allem erklärt die Wissenschaftsgeschichte der Wissenschaft ihre unterschiedlichen Zeitskalen, jede mit ihrem eigenen Tempo – und jede mit dem Potenzial, die Wissenschaft zu transformieren.

Die Wissenschaft tickt mit drei Uhren. Am schnellsten läuft die Zeit der empirischen Entdeckungen: die Forschungsergebnisse, die in der nächsten Nummer von SCIENCE oder NATURE oder anderen Fachzeitschriften erscheinen. Auf dieser Uhr sind Wochen und Monate markiert; sie läuft *tempo allegro*. >

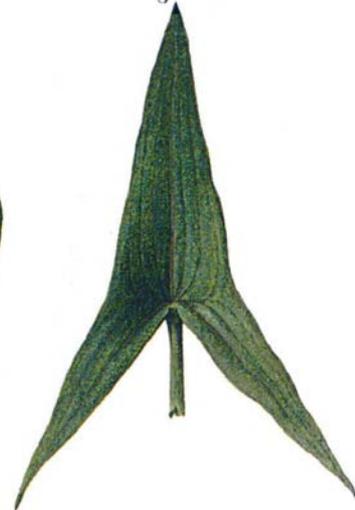
cordata.



reniformia.



flagittata.



panduræformia.



biloba.



triloba.



Malerei statt Fotografie: Botaniker bevorzugten und bevorzugen noch immer gemalte Bilder – wie diese Aquarelle von Franz Bauer aus dem späten 18. Jahrhundert. Im Gegensatz zum Fotografen, der zwangsläufig ein Einzelexemplar ablichtet, kann der Maler die typischen Merkmale von Pflanzen hervorheben.

Die Zeit der Rahmenbedingungen der empirischen Forschung läuft dagegen *andante*. Mit Rahmenbedingungen meine ich die synthetischen Theorien, die unterschiedlichen Fragestellungen innerhalb einer Theorie, aber auch die materiellen Bedingungen der Wissenschaft: die Erfindung von neuen Instrumenten, die gesellschaftliche Unterstützung und Wertschätzung der Forschung, die Rekrutierung der besten Köpfe für diesen Beruf anstelle von anderen. Diese Uhr läuft langsamer, in Einheiten von Jahren und Jahrzehnten.

Die dritte Uhr geht *legato*, in Einheiten von Jahrhunderten oder sogar Jahrtausenden. Sie misst die Zeit der grundsätzlichen epistemischen Tugenden der Wissenschaft, die bestimmte Eigenschaften der Wissenschaft zu einer bestimmten Epoche *als Wissen-*

Nur erfahrene Beobachter sind in der Lage, *signal* von *noise* zu unterscheiden

schafft (in Kontrast zu Wissen, Meinung oder Glaube) definieren: Gewissheit, Wahrheit, Präzision, Objektivität. Mit dieser dritten Uhr, mit der Geschichte des scheinbar Selbstverständlichen in der Wissenschaft, beschäftige ich mich in meiner Forschung.

Gerade weil diese Kategorien sich so langsam entwickeln und so tief im Selbstverständnis der Wissenschaft verankert sind, scheinen sie gar keine Geschichte zu haben. Aber nehmen wir nur ein Beispiel – Gewissheit: Seit fast 2000 Jahren, von der Antike bis zum Ende des 17. Jahrhunderts, galt diese als der Inbegriff von Wissenschaft. *Episteme* auf Altgriechisch, *scientia* auf Lateinisch wurden als gewisses Wissen definiert, als Wissen, das nicht nur den Tatsachen entsprach, sondern von *axiomata* bewiesen werden kann, wie ein Syllogismus in der Logik oder ein mathematischer Beweis.

Selbst Isaac Newton schwebte diese Vision immer noch vor: Er bezeichnete seine Bewegungsgesetze als *Axiomata, sive leges motus*. Die Wissenschaft

als wahrscheinliches, sogar revidierbares Wissen neu zu konzipieren war eine langsame, aber revolutionäre Transformation.

Gewissheit, Wahrheit, Präzision, Objektivität: Das klingt alles so abstrakt. Aber in Wirklichkeit werden diese Ziele in wissenschaftlichen Praktiken ganz handfest ausgedrückt: Fehlerbalken für Messwerte, Monte-Carlo-Simulationen, idealisierte grafische Kurven und Abbildungstechniken sind sämtlich Beispiele dafür, wie diese abstrakt klingenden Kategorien im Alltag der wissenschaftlichen Praxis konkret gemacht werden.

Die drei Zeitskalen der Wissenschaft – *allegro, andante, legato* – sind wie eine Tripelfuge miteinander verflochten. Anhand einer dieser konkreten Praktiken, der Bilddarstellung, will ich den Unterschied zwischen zwei von diesen epistemischen Tugenden – und auch das daraus resultierende Konfliktpotenzial – plastisch machen: Naturwahrheit versus Objektivität. Anschaulich wird das an zwei Abbildungen von Blättern: einem Aquarell aus dem späten 18. Jahrhundert und einem sogenannten Naturselbstdruck aus der Mitte des 19. Jahrhunderts. Beide wurden zu botanischen Zwecken erstellt.

Die auf dem Aquarell abgebildeten Blätter sind sehr naturalistisch von einem Meister der botanischen Kunst namens Franz Bauer dargestellt. Das Aquarell bildet jedoch keine wirklichen, sondern idealisierte Blätter ab, ja sogar Blättertypen: *cordata* (herzförmig), *triloba* (dreiblättrig), *sagittata* (pfeilspitzig).

Das Blatt im Naturselbstdruck hingegen ist der Abdruck eines einzelnen Eichenblattes, zwischen Kupfer- und Bleiplatten gepresst, bis es in dem weichen Blei einen Abdruck hinterließ. Obwohl der Urheber dieses Verfahrens es – nach der Erfindung der Schrift und derjenigen der beweglichen Lettern Gutenbergs – als den dritten großen Augenblick in der Kulturgeschichte pries, waren die Botaniker davon wenig überzeugt. Weder die peinlich genaue Wiedergabe von Details noch die Unmittelbarkeit der Methode konnte sie beeindrucken. Auch die Fotografie wurde in Pflanzenbüchern kaum verwendet. Die Botaniker bevorzugten, und bevorzugen noch immer, Naturwahrheit vor Genauigkeit und Objektivität.



Was genau ist Naturwahrheit? Unter welchen Bedingungen ist diese epistemische Tugend besser zu wissenschaftlichen Zwecken geeignet als andere? Besonders in den klassifizierenden Wissenschaften – Botanik, Zoologie, Anatomie, Kristallografie – zielt die Naturwahrheit auf das Typische: nicht dieses oder jenes menschliche Skelett mit all seinen Idiosynkrasien, sondern *das* menschliche Skelett – oder *der* Gladiolus, *die* elliptische Galaxie oder *der* isometrische Kristall.

Die Naturwahrheit bekämpft nicht nur natürliche Variabilität, sondern auch die Streuung von Daten aller Art. Astronomen, Physiker oder Psychologen, die plötzlich mit einem Datapunkt, der aus der Reihe tanzt, konfrontiert sind, müssen sich entscheiden, ob es sinnvoll ist, diesen Punkt in ihre Berechnungen einzubeziehen. Wenn etwa ein Astronom die Umlaufbahn eines Kometen zu bestimmen versucht und alle Beobachtungen bis auf einen einzigen Ausreißer auf eine Parabel hindeuten – ist es sinnvoll, ist es anständig, diese abweichende Beobachtung zu ignorieren?

Die Naturwahrheit antwortet „ja“, die Objektivität hingegen „nein“. Die Naturwahrheit erkennt Symmetrien und Regelmäßigkeiten unter einem Gewimmel von Variabilität und ermöglicht dadurch Klassifizierung und mathematische Modelle. Obwohl die Naturwahrheit eine Neigung zur Idealisierung hat, fördert sie die höchsten empirischen Anstrengungen.

Nur die erfahrensten Beobachter sind in der Lage, das Typische vom Untypischen, *signal* von *noise* zu unterscheiden. Diese Leistung erfordert ausgereifte Urteilskraft. Und selbstbewusste Intervention in Bild und Daten.

Die Naturwahrheit ist eine uralte epistemische Tugend und gilt noch heute als Ideal, wann auch immer Wissenschaftler in den unterschiedlichsten Disziplinen versuchen, Symmetrien, Regelmäßigkeiten und Typen (etwa Genera von Organismen) unter Bedingungen von Variabilität, Streuung von Daten und Störung (*noise*) aller Art zu erkennen.

Aber ihr goldenes Zeitalter erlebte die Naturwahrheit wahrscheinlich von der Mitte des 16. bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts, dem Zeitalter von Vesalius' *canon* des menschlichen Körpers und Linnés Pflanzen-, „Archetypen“. Von Anfang bis Mitte des 19. Jahrhunderts geriet die Naturwahrheit im-

mer häufiger in Konflikt mit einer neuen epistemischen Tugend, der Objektivität.

Auf den ersten Blick erscheint überraschend, dass die Objektivität, vielleicht die zentrale epistemische Tugend der heutigen Wissenschaft, so spät erscheint.

Das Wort Objektivität ist in der Tat viel älter, es stammt vom spätscholastischen lateinischen Begriff *objectivus* ab, häufig mit *subjectivus* gepaart. Aber diese vertraut klingenden Termini bedeuteten unge-

Der objektive Forscher muss der Versuchung widerstehen, die Natur zu verschönern

fähr das genaue Gegenteil dessen, was wir heute darunter verstehen: „Objektiv“ bezog sich auf Dinge, wie sie sich dem Bewusstsein darstellen, „subjektiv“ dagegen auf Dinge an sich.

Es war aber nicht nur die Bedeutung der Worte, die sich ungefähr im Jahr 1840 um 180 Grad gedreht hat. Objektivität und Subjektivität, früher nur von philosophischem Interesse, sind zunehmend für die empirischen Wissenschaften relevant geworden, und zwar in ganz konkreten Fällen. Seit der Jahrhundertmitte machten sich Wissenschaftler in den unterschiedlichsten Disziplinen – Physiologie, Astronomie, Chemie, Physik, Bakteriologie und auch Philologie – Sorgen über ein neues Hindernis auf dem Weg zum Wissen: die Hürde, die sie selbst darstellten.

Die Forscher befürchteten, das subjektive Selbst neige zur Verschönerung, Idealisierung und im schlimmsten Fall zur Regularisierung von Beobachtungen, um sie theoretischen Erwartungen anzupassen – um zu sehen, was es zu sehen hoffte. Für die Anhänger der neuen epistemischen Tugend Objektivität waren die Interventionen der Anhänger der Naturwahrheit skandalös – subjektive Projektionen der Naturforscher.

Wie sah der Unterschied zwischen Naturwahrheit und Objektivität aus? Oftmals war es ein Kontrast zwischen Zeichnung und Fotografie, wie im Fall des



britischen Physikers Arthur Worthington, der nach 20 Jahren Forschung über das Aufprallen eines Tropfens zugeben musste, dass seine früheren Zeichnungen zu schön, zu symmetrisch waren – eine Projektion seiner Erwartung, eine vollkommene Natur vorzufinden, wie er meinte. Erst anhand der Einführung von fotografischen Methoden erkannte Worthington, dass sein Idealspritzer, sein „Autosplash des inneren Auges“, nicht existierte.

Die Fotografie kann aber der Naturwahrheit ebenso wie der Objektivität dienen. So gibt es vom Ende des 19. Jahrhunderts etwa Mikrofotografien von Schneeflocken, die in dieser Hinsicht aufschlussreich sind. Die einen wurden um 1885 von Wilson Bentley in Vermont aufgenommen, der die Bilder beschnitt, um Unregelmäßigkeiten zu bereinigen. Richard Neuhaus veröffentlichte 1893 in Berlin ebenfalls Schneeflockenbilder; doch sie zeigen Asymmetrien, gebrochene oder fehlende Arme und andere Abweichungen von geometrischer Perfektion.

Während Forscher seit Kepler Schneeflocken als Gegenstand des Beweises für die mathematische Struktur der Natur betrachteten und „beschädigte“ oder „anormale“ Exemplare ganz offen als atypisch entfernten, kritisierte Neuhaus Bentleys Verschönerung seiner Fotos als „völlig willkürlich“. Der objektive Forscher musste selbstdiszipliniert der Versuchung widerstehen, die Natur schöner, symmetrischer oder regelmäßiger darzustellen, als sie tatsächlich war.

Die moralischen Töne von Neuhaus' Vorwürfen an Bentley sind nicht zu überhören. Objektivität war nicht nur eine methodologische, sondern auch eine moralische Anforderung. Fast alle epistemischen Tugenden sind auch moralisch gefärbt. Wie könnte es anders sein? Dies bestimmen nicht nur Praktiken – etwa, ob man Ausreißer wegwerfen darf oder nicht –, sondern ein Berufsethos, das verinnerlicht werden muss. Das Ethos von Naturwahrheit deckt sich nicht immer mit demjenigen von Objektivität: Alle Wissenschaftler dienen der Sache der Wahrheit, aber sie schätzen die Hindernisse unterschiedlich ein.

Wo liegt das größere Risiko, die Wahrheit zu verkennen: in der Variabilität der Natur oder in der Subjektivität des Naturforschers? Weil unterschiedliche epistemische Tugenden wie Naturwahrheit und Ob-

jektivität auch eine jeweils unterschiedliche Geschichte haben, ist es nicht überraschend, dass die Geschichten beider manchmal kollidieren. Aber genau weil dieser unterschiedliche Verlauf von Geschichte für die Wissenschaftler unsichtbar ist, wer-

Fehlverhalten erweist sich als ein Fall von epistemischen Tugenden in Kollision

den solche Kollisionen noch heute des Öfteren als wissenschaftliches Fehlverhalten gedeutet.

Die Konsequenzen können verheerend sein. Ich nenne nur ein Beispiel aus den USA – ohne Namen zu erwähnen, dennoch werden Biologen den Fall wahrscheinlich sofort wiedererkennen. Eine junge Postdoktorandin arbeitet mit einer erfahreneren Wissenschaftlerin zusammen im Labor eines Nobelpreisträgers. Die Postdoktorandin kann die Ergebnisse der Wissenschaftlerin nicht replizieren, obwohl sie die Lehrbuchmethoden akribisch genau ausführt; sie bemerkt auch, dass die publizierten Messwerte nicht immer mit denjenigen im Laborbuch der Wissenschaftlerin übereinstimmen.

Die Postdoktorandin wird zum Whistleblower und wirft ihrer Kollegin Datenverfälschung vor. Weil die Forschung mit Geld der National Institutes of Health finanziert wurde, wird diese Episode zu einem nationalen Skandal, mit Anhörungen im Kongress, Geheimdienstuntersuchungen und ruinierten Karrieren. Nach mehr als zehn Jahren Untersuchung wurde die Wissenschaftlerin vom Office of Research Integrity entlastet.

Andere erfahrene Wissenschaftler konnten ihre Ergebnisse letztendlich replizieren; gerade weil sie Erfahrung hatten, waren sie bereit – ebenso wie die angeklagte Wissenschaftlerin –, manchmal Ausreißerdaten nicht in die publizierte Analyse aufzunehmen. Was Presse und Kongress als einen Fall von wissenschaftlichem Fehlverhalten gedeutet hatten, scheint im Nachhinein eher ein Fall von epistemischen Tu-

genden in Kollision gewesen zu sein: die Objektivität der Postdoktorandin, die Methoden genau ausführte und alle Messwerte in die Analyse aufnehmen wollte, versus die Naturwahrheit der Wissenschaftlerin, die Methoden ad hoc adjustierte und unplausible Werte ignorierte.

Ich möchte nicht missverstanden werden: Es gibt leider echte Fälle von Datenfälschung und wissenschaftlichem Fehlverhalten. Es gibt aber auch echte Kollisionen von epistemischen Tugenden – genau wie ethische Tugenden manchmal miteinander kollidieren. Gerechtigkeit und Gnade sind nicht immer in Einklang zu bringen, ebenso wenig Ehrlichkeit und Höflichkeit.

Die erste Reaktion auf beiden Seiten ist häufig moralische Empörung über die jeweils andere Partei, als ob die Tugend nur auf einer Seite läge. Die historische Perspektive zeigt aber, dass beide Parteien Tugend auf ihrer Seite haben – allerdings unterschiedliche Tugenden mit unterschiedlichen Geschichten. Weil die dritte Uhr der wissenschaftlichen Entwicklung so langsam tickt, bleiben diese Geschichten für die meisten Wissenschaftler unsichtbar.

Hier kann die Wissenschaftsgeschichte eine völlig andere Diskussion ermöglichen, in der nicht fokussiert wird, wer recht und wer unrecht hat, sondern: Welche Ziele wollen wir in diesem konkreten Fall verfolgen, wo liegt die größte Gefahr zu scheitern? ◀



DIE AUTORIN

Lorraine Daston (geboren 1951) ist Direktorin am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin, Gastprofessorin im „Committee on Social Thought“ an der University of Chicago und Honorarprofessorin für Wissenschaftsgeschichte an der Humboldt-Universität zu Berlin. Die gebürtige US-Amerikanerin promovierte 1979 an der Harvard University und lehrte unter anderem an den Universitäten Harvard, Princeton und Göttingen. Dastons Forschungsschwerpunkt liegt auf den Idealen und Praktiken der Rationalität. Zudem hat sie zu vielen wissenschaftshistorischen Themen publiziert, etwa zur Geschichte der Wahrscheinlichkeit und Statistik, zum Problem der Wunder in den frühen modernen Wissenschaften und zur Geschichte der wissenschaftlichen Objektivität.



Bildung ist ein hohes Gut

An den Max-Planck-Instituten arbeiten Wissenschaftler aus 55 Ländern dieser Erde. Hier schreiben sie über persönliche Erlebnisse und Eindrücke. Suhrud Ghosh aus Indien forschte längere Zeit im Himalaja an Schwebfliegen und arbeitet seit Kurzem als Doktorand am Dresdner Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik. Der 24-Jährige möchte eines Tages als Lehrer in seine Heimat zurückkehren.

Ich liebe es, zu wandern und zu campen, in der Natur zu leben und zu arbeiten. Wenn ich die Wahl hätte, würde ich die Feldarbeit im Dschungel immer der Laborarbeit vorziehen. Aber manche Dinge kann man im Dschungel eben nicht gut erforschen, und deswegen bin ich vor einigen Monaten als Doktorand ans Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik gegangen.

In dem kleinen Dorf des Himalaja, wo ich als Masterstudent zusammen mit der Biologin Shannon Olson mit Insekten gearbeitet habe, ist Bildung ein Privileg: Ich habe oft beobachtet, wie sich die Kinder in der Dämmerung der Morgenstunden vor dem Haus ihrer Lehrerin versammelten, um sie für die Wanderung zum Schulhaus abzuholen – ein beschwerlicher Weg über Stock und Stein. Sie marschierten morgens zwölf Kilometer bergauf und abends wieder bergab. Und das nur, um in die Schule gehen zu können. Die Neugier trieb sie an und vielleicht auch die Hoffnung auf ein besseres Leben.

Am Nachmittag haben sie uns Forscher dann besucht und gefragt, welche Experimente wir machen. Es ging uns darum zu untersuchen, wie Schwebfliegen sich im hohen Gebirge orientieren und ihre Blumen finden. Die Kinder des Bergdorfes wussten sofort ganz intuitiv, wieso das wichtig ist, und hatten ihren ganz eigenen unverfälschten Zugang zu dem Thema – viel besser als Erwachsene.



Suhrid Ghosh, 24, hat von 2012 bis 2014 Mikrobiologie (MSc) in Vadodara/Indien studiert, bevor er von 2014 bis 2015 mit Shannon Olson Projektstudien zu Schwebfliegen am National Centre for Biological Sciences in Bangalore/Indien angefertigt hat. Seit dem Jahr 2015 forscht er als Doktorand bei Suzanne Eaton am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik in Dresden.

Überhaupt ist es ein großes Geschenk, wenn Natur so direkt für Kinder erlebbar ist. Ich habe einen Großteil meiner Kindheit auf einem kleinen Bauernhof in der Nähe von Kalkutta verbracht. Meine Vorfahren waren traditionelle Milchbauern. Ich wusste genau, wie man Kühe wäscht und melkt und wie man einen Stall führt. Gleichzeitig hatte ich das Glück, einen sehr direkten Zugang zu Bildung zu erhalten, aber im bevölkerungsreichen Indien ist das nicht der Normalfall. Es gibt so viele Menschen mit großartigen Ideen, aber viele haben nie eine Schule besucht. Dabei ist Bildung doch eins der grundlegendsten Menschenrechte.

Wenn meine Zeit als Wissenschaftler vorbei ist, möchte ich mich dafür einsetzen und als Lehrer in Indien arbeiten – das stelle ich mir sehr erfüllend vor, denn Lehrer haben in der indischen Gesellschaft eine wichtige Funktion. Nicht zuletzt war es auch ein Lehrer, der mir am Gymnasium erst von der Max-Planck-Gesellschaft als Forschungsinstitution erzählt hat. Er habe da mal einen sehr guten Schüler gehabt, der hieß Rupak Majumdar, und dieser sei jetzt sogar Max-Planck-Direktor.

So wurde Rupak zu einer Art Vorbild für mich, denn er kam aus derselben Stadt und derselben Schule wie ich und war jetzt ein international angesehener Wissenschaftler. Viel später, als Masterstudent, fiel mir dann der Name Max Planck wieder ein, und ich bewarb mich nach Dresden. Natürlich war das eine große Umstellung, aber die Kollegen am Institut sind sehr freundlich und hilfsbereit. Und außerdem wurde mir gesagt, dass man hier im Elbsandsteingebirge auch sehr gut wandern und klettern kann. Das werde ich sehr bald testen.

Ohne Worte

Der Mensch braucht Gesten, um sprechen zu lernen. Gesten helfen, Gesagtes zu betonen und zu strukturieren. **Simone Pika** vom **Max-Planck-Institut für Ornithologie** in Seewiesen möchte wissen, ob Gesten in der Evolution ein Vorläufer der menschlichen Sprache waren. Die Forscherin untersucht dafür die Kommunikation von Menschenaffen, Rabenvögeln – und Babys.

TEXT **CATARINA PIETSCHMANN**

Ein ohrenbetäubendes Rufkonzert tönt durch den Regenwald, und alles rennt aufgeregt durcheinander. Es herrscht Chaos. Paviane haben eine kleine Antilope zur Strecke gebracht, aber eine Schimpansengruppe hat ihnen die Beute gleich wieder abgejagt. Das Alphamännchen Bartok schleppt den Fang mit sich herum, und einige seiner Artgenossen betteln ihn um Fleisch an.

Doch Bartok will erst einmal selbst in Ruhe fressen und lässt sich mit dem toten Tier nieder, keine vier Meter entfernt von der blonden Frau. Simone Pika hat die Schimpansen schon einige Zeit auf ihren täglichen Streifzügen durch den Kibale-Nationalpark begleitet und kann kaum fassen, wie dicht Bartok nun vor ihr sitzt.

Zwei Männchen wagen sich an Bartok und die Wissenschaftlerin heran. Während das eine sich einfach neben Bartok setzt, die ausgestreckte Hand erst aufhält und dann sanft an der Antilope pupft, ist das andere Männchen weniger selbstbewusst. Es lässt sich zwar auch neben Bartok nieder, macht dann aber

Bettel- und Beschwichtigungsgesten: Es duckt sich, schaukelt hin und her, fiept wie ein Schimpansenkind und setzt ein sogenanntes Angstgrinsen auf. Tu mir nichts, aber gib mir etwas, heißt das. Überredet: Bartok reißt die Antilope auseinander und teilt kleine Stücke mit den beiden.

FORSCHER HALTEN ABSTAND

„Wenn man so etwas live beobachten darf, sitzt man abends im Camp und ist einfach nur glücklich“, sagt Pika im Rückblick auf dieses Erlebnis. Denn anders als zu Zeiten der jungen Jane Goodall füttern Wissenschaftler Schimpansen im Freiland nicht mehr an, sondern suchen sie jeden Tag von Neuem im Wald – sie orientieren sich an den Nestern und Futterbäumen und den Rufen. Ein Mindestabstand von sieben Metern ist ein Muss und wird nur in ganz seltenen Fällen unterschritten, etwa in der aufgeladenen Atmosphäre einer Jagd.

Pika muss auch gar nicht näher heran, um die Gesten zwischen den Tieren zu filmen. Die 43-Jährige leitet am

Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen die Humboldt-Forschungsgruppe „Evolution von Kommunikation“. Sie will eines der größten Rätsel der Evolution lösen: Wie entstand die menschliche Sprache?

Eine Theorie besagt, dass unsere Vorfahren zunächst gestikulierten, bevor sie Sprache verwendeten. Einfache Informationen könnten sie demnach anhand von Gesten kommuniziert haben. „Doch ich halte dies wie viele meiner Kollegen inzwischen für unwahrscheinlich, denn Gesten werden vor allem in entspannter Atmosphäre zwischen Individuen verwendet, die sich berühren können oder Sichtkontakt haben“, sagt Pika.

Was aber, wenn man einen Artgenossen im undurchdringlichen Regenwald über eine größere Distanz vor einem Räuber warnen möchte? „Dann funktionieren Lautäußerungen natür-

Wie alle Menschenaffen verständigen sich auch Gorillas über Gesten. Die Tiere benutzen diese Kommunikationsform vorwiegend in entspannter Atmosphäre und über geringe Entfernungen hinweg.



lich viel besser als Gesten.“ Die meisten Forscher vermuten daher inzwischen, dass Lautäußerungen und Gestik parallel entstanden sind.

Während ihrer Doktorarbeit bei Michael Tomasello am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig untersuchte Pika die Gesten von Gorillas und Bonobos in verschiedenen europäischen Wildparks und Zoos. Doch gleicht das Verhalten dort wirklich jenem in freier Wildbahn? Oder gestikulieren Tiere in Gefangenschaft vor allem, weil die natürliche Umgebung fehlt und sie einander ständig ausgesetzt sind?

Die junge Forscherin musste also hinaus in die Natur. „Als ich 2005 die Möglichkeit erhielt, eine Schimpansen-Gruppe im Kibale-Nationalpark zu untersuchen, hielt mich nichts mehr zu Hause. Der erste Tag ist mir immer noch unvergesslich: Kein einziger Schimpanse war weit und breit zu sehen, aber der Wald war erfüllt von ihren Rufen, den mehrere Hundert Meter weit hörbaren *pant-hoots*. Diese Rufe waren viel häufiger als bei Schimpansen in Gefangenschaft; sie spielen folglich in natürlichen Lebensräumen eine ganz andere Rolle“, erzählt Pika.

Pant-hoots sagen den Schimpansen, wer sich wo und mit wem im Wald aufhält. Außerdem reklamieren die Tiere damit gute Futterplätze für sich. Zur Begrüßung äußern sie leisere *pant-grunts*. Manche Tiere machen dazu auch Gesten, wie Pika beobachtet hat. In einer neuen Studie mit ihrer Postdoktorandin Eva Luef widmete sich die Forscherin deshalb der Frage, ob es, wie bei uns Menschen, Konventionen zur Begrüßung gibt und, wenn ja, ob diese vom sozialen Rang eines Tieres abhängig sind. Gestik spielt folglich in Situationen eine Rolle, in denen auch Menschen miteinander sprechen würden: im direkten Austausch, wenn Individuen sehr nah beieinander sind.



Im Jahr 2010 erhielt Pika den mit 1,65 Millionen Euro dotierten Sofja Kowalevskaja-Preis der Alexander von Humboldt-Stiftung; sie setzt diese Mittel ein, um die Evolution und Entwicklung von Kommunikation in drei unterschiedlichen Modellgruppen zu untersuchen: bei Kindern, die in verschiedenen Kulturen leben, bei unseren nächsten Verwandten, den Menschenaffen, sowie bei Arten, die in vergleichbar komplexen Sozialgefügen leben – den Rabenvögeln. Auf diese Weise will Pika herausfinden, wie weit die kommunikativen Fähigkeiten unserer Vorfahren entwickelt waren und welche Faktoren dazu geführt haben, dass ausschließlich der Mensch Sprache besitzt.

Dass sich auch Menschenaffen mit Gesten verständigen, ist inzwischen allgemein akzeptiert. Zeigegesten dagegen hielt man bis vor Kurzem für ein rein menschliches Verhalten. Doch in Zoos zeigen Schimpansen eindeutig auf Trauben oder Bananen und bedeuten den Wärtern damit: Das will ich! Offenbar lernen Schimpansen und Bonobos in menschlicher Obhut, dass sie Menschen mit Zeigegesten auf Gegenstände in ih-

rer Umgebung aufmerksam machen können und diese dann auch bekommen. In ihrer natürlichen Umgebung findet ein solcher Austausch selten und nur zwischen Freunden oder Müttern und ihren Kinder statt.

GESTEN ZEIGEN, WO'S JUCKT

Die bisher im Freiland beobachteten Zeigegesten werden dagegen vorwiegend im Zusammenhang mit gegenseitigem Lausen verwendet. Dieses Verhalten dient nicht nur der Fellpflege, sondern vor allem dazu, Bindungen aufzubauen und zu erhalten. Simone Pika fand heraus, dass Schimpansen Kratzgesten einsetzen, um dem anderen zu signalisieren, dass und wo sie gelaut werden möchten. „Schimpansen wissen demnach, dass der andere versteht, was die Geste bedeutet“, sagt die Max-Planck-Forscherin.

Zeigegesten werden auch von vielen Vogelarten beim Balzen verwendet. Und das, obwohl Vögel auf einem vom Menschen weiter entfernten Ast des Evolutionsbaums sitzen. Kolkraben zum Beispiel: Sie sind nicht nur intelli-

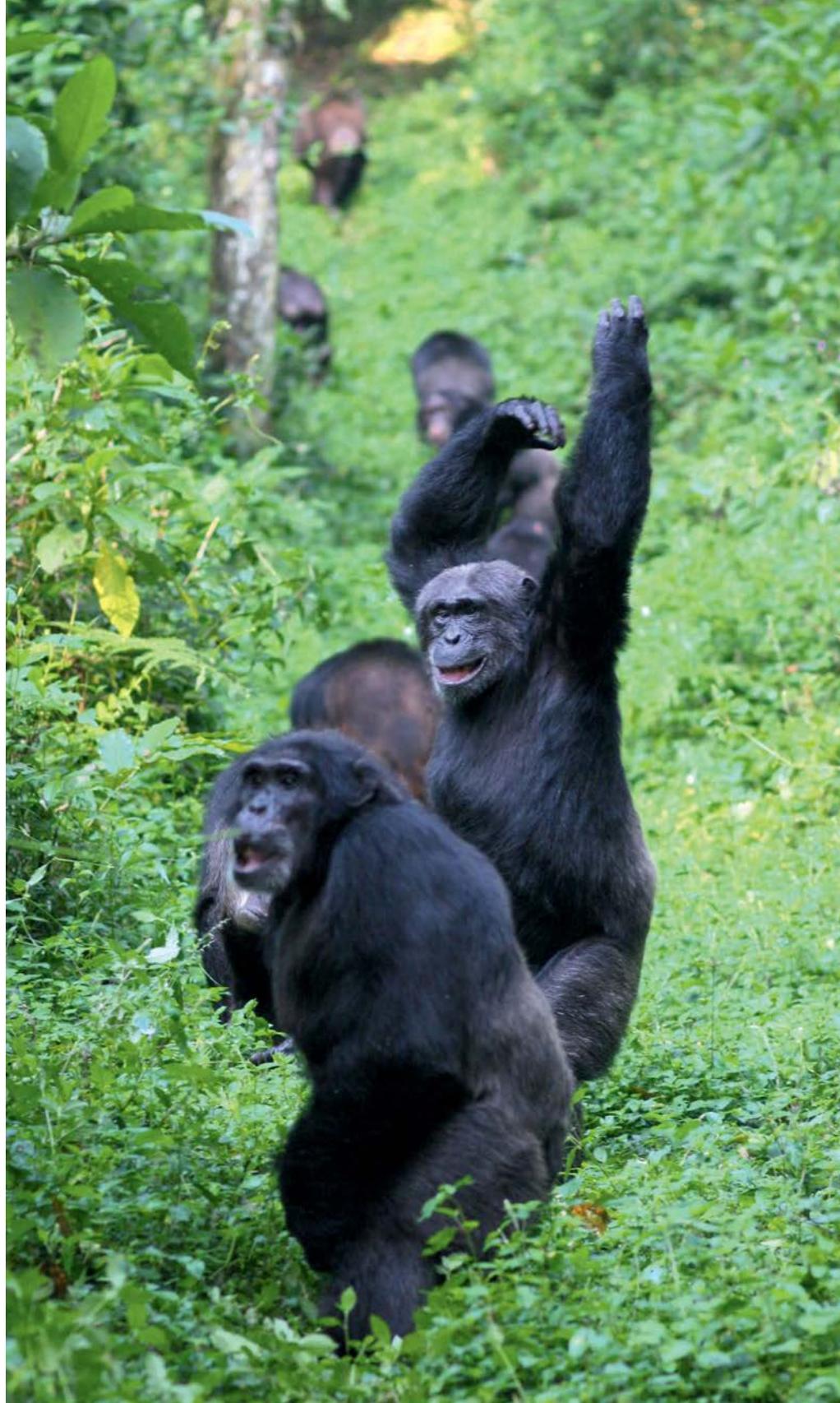
Links Je selbstständiger Schimpansenkinder werden, umso weniger werden sie von ihren Müttern getragen. Mit dem ausgestreckten Arm und mit Blickkontakt bedeutet diese Schimpansenmutter ihrem Kind, dass es Zeit ist, einen der sichersten Plätze im Regenwald des Kibale-Nationalparks in Uganda einzunehmen: Mamas Rücken.

Rechts Schimpansen verwenden über 100 verschiedene Gestentypen. Manche Gesten werden nur von einem einzigen Tier einer Gruppe verwendet. Das Schimpansenmännchen Dolphi zum Beispiel streckt seine Arme über seinem Kopf vertikal in die Luft, um dem Alphamännchen (vorne) zu signalisieren, dass es der Gruppe folgen soll.

gent und lernfähig, sie benutzen auch Objekte für Zeigegesten. Pika entdeckte, dass Raben mit ihren Schnäbeln Gegenstände aufheben, um sie einem Artgenossen anzubieten oder um damit die Aufmerksamkeit eines potenziellen Partners zu erregen. Manchmal wollen sie auch einfach nur darum raufen.

„Kinder machen das auch – Schimpansen erstaunlicherweise nicht. Sie raufen zwar auch um Objekte, halten aber keine Gegenstände hoch, um sie einander zu zeigen oder anzubieten. Die meisten gestischen Interaktionen finden bei den Schimpansen ohne Objekte statt“, sagt Pika. Menschenaffen benutzen Zeigegesten also nur, um die Aufmerksamkeit von Artgenossen zu erregen, aber nie, um andere über etwas in der Umgebung zu informieren.

Raben lausen einander zudem wie Affen – aber nur an den Stellen, die sie selbst nicht erreichen. Dazu rutschen sie dicht an den Partner heran und präsentieren die Stelle, an der es juckt. Junge Vögel lassen sich auch gern mit ausgebreiteten Flügeln rückwärts in den Schnee fallen. Ein Vogel, der auf dem Rücken liegt, ist normalerweise tot. Ein



auf dem Rücken liegender Rabe signalisiert dagegen: Ich will spielen! Auch Kickgesten mit dem Fuß sind von Raben bekannt.

Die Zeigegesten von Raben und Affen sind also ein typischer Fall von paralleler Evolution, denn Raben und Affen können dieses Verhalten nicht

von ihrem gemeinsamen Vorfahren übernommen haben. „Mithilfe der Raben können wir solche Fälle von ähnlicher, aber unabhängig voneinander verlaufender Evolution erkennen und die Gründe für die Entstehung von Gestik verstehen. Denn nicht alles, was Menschen und Schimpansen tun, muss



auch schon bei unserem gemeinsamen Vorfahren vorhanden gewesen sein“, meint Simone Pika.

Menschen äußern sich von Geburt an mit Lauten – manchmal sehr zum Leidwesen übernächtliger Eltern. Aber auch für Babys und Kleinkinder sind Gesten ein zentrales Kommunikationsmittel, bevor sie sprechen lernen. Für diese Art der Kommunikation haben sich bisher jedoch nur wenige Forscher

interessiert. Pika, jetzt selbst Mutter einer fast zweijährigen Tochter, war durch ihre Arbeit mit den Affen sensibilisiert und wollte es genauer wissen.

Als sie vor vier Jahren an das Max-Planck-Institut in Seewiesen wechselte, richtete sie deshalb im ehemaligen Gänsehaus des legendären Verhaltensforschers Konrad Lorenz ein Spielzimmer für Kleinkinder ein. Bei der Kommunikation mit den Eltern beobachtete

sie hier zusammen mit Mitarbeitern ihrer Arbeitsgruppe Kleinkinder im Alter von fünfeinhalb Monaten bis zu dem Zeitpunkt, an dem sie drei Wörter sprechen konnten.

Bei Kindern gibt es schon sehr früh Lautäußerungen, die wie eine Frage klingen. Ab neun bis zwölf Monaten folgen meistens die ersten Zeigegesten. „Zuerst deuten sie auf etwas, ohne sich zu vergewissern, ob es andere auch sehen. Vielleicht, weil die Geste ihnen hilft, selbst etwas zu verinnerlichen, erste Gedanken zu strukturieren“, sagt Pika. Erst später suchen Kinder den Blick der Eltern und informieren diese durch Zeigen, wenn sie etwas haben wollen, etwa: Da ist der Teddy!

Gestikulieren hilft Kindern beim Sprechenlernen. Aber welche Funktion hat es bei Erwachsenen? Zum einen reden wir mit den Händen, um das Gesagte für ein Gegenüber bildhafter zu machen. „Wir tun es aber auch für uns selbst. Das merkt man daran, dass die Geste immer vor oder gleichzeitig mit dem betreffenden Wort geformt wird. Wir haben die Idee noch nicht auf der Zunge, aber bereits in den Händen, be-

ELTERN, FORSCHT MIT!

Erst Laute, dann Gesten und endlich die ersten Wörter! Für Eltern, welche die Etappen der Sprachentwicklung von Babys im Alter von null bis 24 Monaten festhalten möchten, hat Simone Pika mit ihrer Assistentin Monika Krug einen Sprachkalender entwickelt. Interessierte Eltern können vertraulich bei einer Onlineumfrage mitmachen und dort anhand eines Entwicklungskalenders die Fortschritte ihres Babys dokumentieren. Wer möchte, kann damit auch anonym am Forschungsprojekt „Meilensteine der Sprache“ teilnehmen, das im November 2015 startete und noch bis Ende 2017 läuft.

Ausführliche Informationen und den Sprachkalender zum Download finden Sie unter www.orn.mpg.de/meilensteine

Links Kolkkraben sind sehr soziale Tiere. Ähnlich wie die Menschenaffen festigen die Vögel auch mit der gegenseitigen Körperpflege ihre Bindung zu Artgenossen.

Rechts Simone Pika hat die Gestik bei individuell markierten Kolkkraben einer wilden Rabenkolonie im Cumberland Wildpark in Grünau in Österreich erforscht. In Seewiesen untersucht sie an von Hand aufgezogenen Raben die Entwicklung von Kommunikationssignalen im Detail.



vor wir sie aussprechen“, erklärt die Wissenschaftlerin. Gesten helfen uns, Gedanken zu strukturieren. Das lässt sich bei Kleinkindern sehr gut beobachten: Je schwieriger ein Sachverhalt ist, desto mehr abbildende Gesten setzen sie ein.

An der Edmonton University im kanadischen Alberta untersuchte Simone Pika von 2003 bis 2005 ein interessantes Phänomen: die Gestik zweisprachiger Erwachsener. Gestikulieren Menschen in ihrer Muttersprache anders als in der Zweitsprache? Das Resultat: ja – vor allem, wenn sie die Muttersprache besser beherrschen. In der Zweitsprache benutzen die Menschen dann mehr bildhafte Gestik. Ein weiteres Ergebnis: Wer eine gestenreiche Sprache lernt, gestikuliert bald auch in seiner Muttersprache stärker.

Die erste Forscherin, die die Entwicklung von Kommunikation zwischen Mensch und Menschenaffe verglich, war die Russin Nadeschda Ladygina-Kohts. Sie entdeckte, dass die ersten kindlichen Sprechversuche Gesten und Gesichtsausdrücke beinhalten, die denen von Schimpansenkindern verblüf-

chend ähneln. Zu jener Zeit gab es etliche Versuche, Affenbabys wie Menschenkinder im Haushalt aufzuziehen. Gorilla Toto etwa lebte neun Jahre bei einer Familie in Zentralafrika. Aber trotz aller Bemühungen – nie begann ein Tier zu sprechen. Heute weiß man, dass die Anatomie des Kehlkopfes und dessen Nervenverbindungen mit der Zunge nicht zulassen, dass ein Affe komplexe Laute oder gar Wörter produziert.

GELEHRIGE SCHÜLER

Ende der 1960er-Jahre gelang es Wissenschaftlern, der Schimpansendame Washoe mehr als 300 Zeichen der amerikanischen Gebärdensprache beizubringen. Washoe kommunizierte nicht nur mit ihren Trainern, sondern auch mit ihrem Adoptivsohn via Gebärdensprache. Und sie kombinierte selbst Zeichen zu neuen sinnvollen Worten: Erblickte sie etwa das erste Mal eine Ente, machte sie daraus „Wasser“ und „Vogel“.

Gorilla Koko und Orang-Utan Chantek beherrschten ebenfalls Gebärdensprache. Bonobo Kanzi kann ein Key-

board mit Symbolen bedienen, die für Objekte stehen, diesen aber nicht ähneln. Wenn ihm der Sinn nach Pizza steht, tippt er zum Beispiel auf ein Raute-Symbol, für Banane auf ein Dreieck.

„Aber das sind Einzelfälle. Aus dem Grundvokabular, das die Tiere lernten, sind nur ganz selten neue Wortschöpfungen entstanden. Und – für mich ganz bezeichnend – der Großteil der Kommunikation der Tiere drehte sich um sie selber im Hier und Jetzt: Ich möchte essen, ich will spielen, lass uns in den Garten gehen“, sagt Pika. Kommunizierte Gedanken über das, was gestern war und morgen sein wird, gebe es bei Schimpansen und anderen Affen im Gegensatz zum Menschen nicht.

Affen können folglich nicht nur aus anatomischen Gründen nicht sprechen. Sie scheinen keine Gedankenwelt zu besitzen, die sie mit Sprache weitergeben können oder möchten. Die Verständigung mittels Gesten ist folglich für Menschenaffen eine effiziente Form der Kommunikation ohne Symbolik. Ähnlichkeiten zu menschlicher Sprache und menschlicher Kommunikation finden sich jedoch in Bezug auf das zu-

» Ein Vergleich von Lautäußerungen und Gestik bei Menschenaffen hilft nicht, die Entstehung von Sprache zu erklären.

grunde liegende Kommunikationsgerüst, das Kooperation, Rollenwechsel und Verhandlung beinhaltet.

Der Komplexität menschlicher Sprache kommt am ehesten der Gesang von Vögeln nahe, vor allem in puncto Kombinations- und Lernfähigkeit: Singvögel und Papageien können einzelne Töne oder Klangfolgen neu kombinieren und so neue Strophen kreieren. Zudem imitieren sie Töne, Stimmen und Laute, etwa ein Handyklingeln oder das Geräusch eines startenden Motors.

Vögel scheinen ihrem Gesang jedoch keine andere Bedeutung zu geben, um einem Artgenossen etwas Neu-

es mitzuteilen. „Vogelgesang heißt vor allem: ‚Dies ist mein Territorium‘ und ‚Bin ich nicht beeindruckend?‘“, stellt Pika fest. Auch diese Art der Kommunikation unterscheidet sich folglich in vielen Punkten erheblich von menschlicher Sprache.

BONOBOS VERSTÄNDIGEN SICH SCHNELLER ALS SCHIMPANSEN

Zurück zur Gestik der Menschenaffen. Dass es hierbei sogar zwischen so nah verwandten Arten wie Schimpansen und Bonobos Unterschiede gibt, hat Pika mit ihrer Doktorandin Marlen Fröhlich und weiteren Kollegen in einer Vergleichsstudie zur Kommunikation frei lebender Schimpansen in Uganda und der Elfenbeinküste sowie von Bonobos in der Demokratischen Republik Kongo herausgefunden. Dabei haben die Wissenschaftler entdeckt, dass Informationen zwischen Mutter und Kind bei Bonobos fließender und schneller ausgetauscht werden als bei Schimpansen.

Der zeitliche Ablauf bei Bonobos ähnelt somit dem menschlicher Konversation mehr als dem von Schimpansen. Will etwa eine Bonobomutter aufbrechen, wendet sie sich ihrem Kind zu und hält ihm den ausgestreckten Arm entgegen. Fast zeitgleich läuft der Sprössling auf sie zu und klettert auf ihren Rücken. Der Adressat der Geste antwortet also bereits, während die Botschaft noch gar nicht vollständig verschickt wurde.

Kleinkinder zeigen zuerst für sich selbst auf etwas. Etwas später verstehen sie, dass Gesten eine Botschaft an andere enthalten können. Blickkontakt mit den Eltern soll dann sicherstellen, dass sie deren Aufmerksamkeit haben.

Die Mutter-Kind-Kommunikation bei Schimpansen ist dagegen häufig durch längere Verhandlung gekennzeichnet: Die Mutter wendet sich ihrem Kind zu und streckt ihm den Arm entgegen. Beide schauen sich an. Die Mutter bewegt den Arm noch einmal in Richtung ihres Sprösslings, aber nun schneller und mit einer kürzeren Bewegung. Erst jetzt kommt das Junge auf sie zu und klettert auf ihren Rücken.

Bonobos antizipieren demzufolge vielleicht schneller, was der andere vorhat. Oder sie können es sich einfach leisten, schneller, aber somit vielleicht auch falsch zu reagieren, da ihre Gesellschaft toleranter und weniger aggressiv ist. Zudem sind die Weibchen einflussreicher. Diese Unterschiede im Kommunikationsstil decken sich mit vergleichenden Studien über den Aufbau des Gehirns: Die Bereiche, die für Empathie wichtig sind, sind bei den Bonobos ausgeprägter als bei den Schimpansen.

Angesichts ihrer Ergebnisse kommt Simone Pika zu dem Schluss: „Die Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen Lautäußerungen und der Gestik unserer nächsten Verwandten werden uns nicht helfen, das Rätsel der Spracherevolution zu entschlüsseln. Sprache beruht auf unterschiedlichen kognitiven Fähigkeiten, die vor der Sprachentstehung bereits vorhanden waren.“

Eine Voraussetzung für Sprache ist die sogenannte interaktive Intelligenz. Wenn wir miteinander sprechen, wechseln wir uns ständig ab: Einer spricht, der andere hört zu, dann antwortet der Zuhörer und so weiter. Ein Gespräch ist wie ein Pingpong-Spiel, bei dem Fragen und Antworten schnell hin- und herfliegen und dem spezifische Regeln zugrunde liegen, was die Rollen und die



Simone Pika erforscht die kommunikative Entwicklung von Individuen in drei Modellgruppen: bei Kindern verschiedener menschlicher Kulturen, verschiedenen Menschenaffenarten (Bonobos, Gorillas und Schimpansen) und Rabenvögeln (Krähen und Raben). Ihre Ergebnisse zeigen, dass sich Gestik gerade bei solchen sozialen Tieren entwickelt hat, die miteinander kooperieren.

zeitliche Beziehung betrifft. Sprecher und Zuhörer befinden sich in einem kooperativen Miteinander, sonst scheitert die Kommunikation.

Findet man Vorstufen dieser Kooperation bei Affen? „Eindeutig ja“, meint Pika. Will die Mutter einen Ort mit ihrem Kind verlassen, muss sie klarmachen, wen sie mit ihrer Geste meint, und sich vergewissern, dass das Kind versteht, was sie mitteilen möchte. Ohne eine solche kommunikative Zusammenarbeit zwischen Mutter und Kind würde das nicht funktionieren.

Die Kommunikation von Tieren unterscheidet sich hinsichtlich Art und Zweck also prinzipiell nicht von jener des Menschen. Tiere kommen aber offensichtlich auch ohne Sprache ganz gut klar. Würde es Schimpansen denn nützen, wenn sie sprechen könnten? Simone Pika nickt. „Natürlich. Sprache hat uns förmlich in ein neues Universum katapultiert: Wir können über Symbole nachdenken und uns über Dinge austauschen, die wir nicht direkt vor uns haben, die gestern passiert sind oder die morgen passieren könnten.“

Außerdem ist Sprache die Grundlage für die Schrift. Damit können wir Erfahrungen festhalten und sie an die Nachkommen weitergeben. Auf diese Weise geht unser Wissen nicht verloren und wächst von Generation zu Generation. „Keine Frage: Sprache mach-



ten den Menschen zu einem der erfolgreichsten Lebewesen auf der Erde“, betont Pika.

Was aber wäre, wenn die Evolution ein klein wenig anders verlaufen wäre? Wenn Gorillas oder Schimpansen vor uns diese Fähigkeit erlangt hätten? Ist

der Gedanke, dass es in einer anderen Galaxie einen Planeten gibt, auf dem tatsächlich Affen den Ton angeben, nur eine Fiktion? Falls nicht, bleibt zu hoffen, dass sie mit ihren nächsten Verwandten respektvoller umgehen als wir auf der Erde mit ihnen. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Gesten unterstützen die menschliche Sprache: Sie helfen Babys beim Sprechenlernen. Erwachsene können das Gesagte mit Gesten unterstreichen.
- Gesten sind nicht die Vorläufer der menschlichen Sprache.
- Auch viele Tiere kommunizieren mit Gesten. Menschenaffen und Raben zeigen sogar auf Dinge, um Artgenossen darauf aufmerksam zu machen.

GLOSSAR

Bonobos: Neben den Schimpansen (*Pan troglodytes*) sind Bonobos (*Pan paniscus*) unsere nächsten lebenden Verwandten. Obwohl die Tiere im Deutschen auch als Zwergschimpansen bezeichnet werden, sind sie nur wenig kleiner als die Schimpansen. Körper und Kopf sind jedoch graziler, das Gesicht dunkler gefärbt, der Mund von Bonobokindern ist röter gefärbt als der von Schimpansenjungen. Bonobos leben ausschließlich in der Republik Kongo südlich des Flusses Kongo.

Pant-hoots: Diese besonders lauten Rufe der Schimpansen sind im Regenwald kilometerweit zu hören. Die Rufe bestehen in der Regel aus vier Lautelementen, können aber variiert werden. Vermutlich können sich die Tiere an ihren *pant-hoots* individuell erkennen. Die Tiere rufen zu unterschiedlichen Anlässen, etwa während ihrer Wanderungen, wenn sie an ihren Futterbäumen ankommen oder wenn sie auf ihre eigene Gruppe stoßen.



Erst reden, dann denken

In normalen Unterhaltungen beginnen wir oft zu sprechen, bevor wir genau festgelegt haben, was wir sagen wollen. **Antje Meyer** und ihr Team am **Max-Planck-Institut für Psycholinguistik** in Nijmegen gehen der Frage nach, wie wir Aussagen planen und welche Hindernisse es dabei geben kann. Dafür schicken die Forscher Probanden aufs Laufband, sie bauen virtuelle Umgebungen und fahren nach Indien, um dort zu untersuchen, was Analphabeten bei der Sprachverarbeitung anders machen.

TEXT STEFANIE REINBERGER

Auf dem Monitor flimmert eine cartoonhafte Skizze. Zu sehen ist ein Hund, der einen Postboten beißt. Zack, die nächste: Diesmal schiebt ein Mädchen einen Jungen, der auf einem Schlitten sitzt. Dann: Eine Frau gibt einem Jungen einen Keks. Die Probandin blickt konzentriert auf den Bildschirm und versucht, die kleinen wechselnden Szenen so schnell wie möglich in Worte zu fassen. Ihr Kopf ruht dabei auf einer Kinnstütze, damit er nicht wackelt. Denn während die Frau Bilder beschreibt, verfolgt eine Wissenschaftlerin mithilfe einer speziellen Augenbewegungskamera, wie ihr Blick über die Zeichnungen wandert. So wollen Antje Meyer und ihr Team der Abteilung „Psychologie der Sprache“ im Max-Planck-Institut für Psycholinguistik herausfinden, wie Menschen Sätze planen.

In einer Unterhaltung reihen sich Frage und Antwort oft nahtlos aneinander. Scheinbar mühelos bilden wir

Sätze – offensichtlich ohne uns groß Zeit zu nehmen, diese zu planen. Vielmehr beginnen viele Sprecher ihre Sätze, noch bevor sie im Detail wissen, was sie sagen wollen. Das gelingt, weil die Sprachplanung schneller ist als das Artikulieren der jeweiligen Worte. Ein Beispiel: Während man „Das kleine Mädchen...“ sagt, bleibt genügend Zeit, um im Hintergrund den zweiten Satzteil „...wirft den Ball“ vorzubereiten.

PAUSEN UND „ÄHS“ HELFEN BEI DER SATZPLANUNG

Doch wie funktioniert das genau? Verfügen wir etwa über generelle Strategien zur Sprachplanung, die uns dabei unterstützen, Antworten zu formulieren – ohne viel darüber nachdenken zu müssen? Diese Frage sollen die Experimente mit der Augenbewegungskamera beantworten. Das Gerät bestimmt auf die Millisekunde genau, wo der Blick des Betrachters verweilt.

Schaut sich die Probandin also besagten Hund an, der den Postboten beißt, erfasst das Kamerasystem, welchen Bildausschnitt die Frau am intensivsten betrachtet, bevor sie das Gesehene in Worte packt. Daraus lässt sich folgern, welchen Informationen sie am meisten Aufmerksamkeit widmet, während sie ihren Satz vorbereitet.

Bei einfachen Sachverhalten wie „Der Hund beißt den Postboten“ folgen die Blickbewegungen der meisten Versuchspersonen demselben Muster: Nach einer kurzen Orientierungsphase, in der die Probanden oft in die Bildmitte schauen, betrachten sie die Bildregionen in der Reihenfolge, in der sie später im Satz auftauchen. Das heißt, der Blick wandert vom Hund zu der Stelle, an welcher der Hund seine Zähne ins Bein des Postboten versenkt, und schließlich zum Gesicht des Postboten.

Gilt es allerdings komplexere Sachverhalte zu beschreiben oder werden die Äußerungen länger, dann variieren die

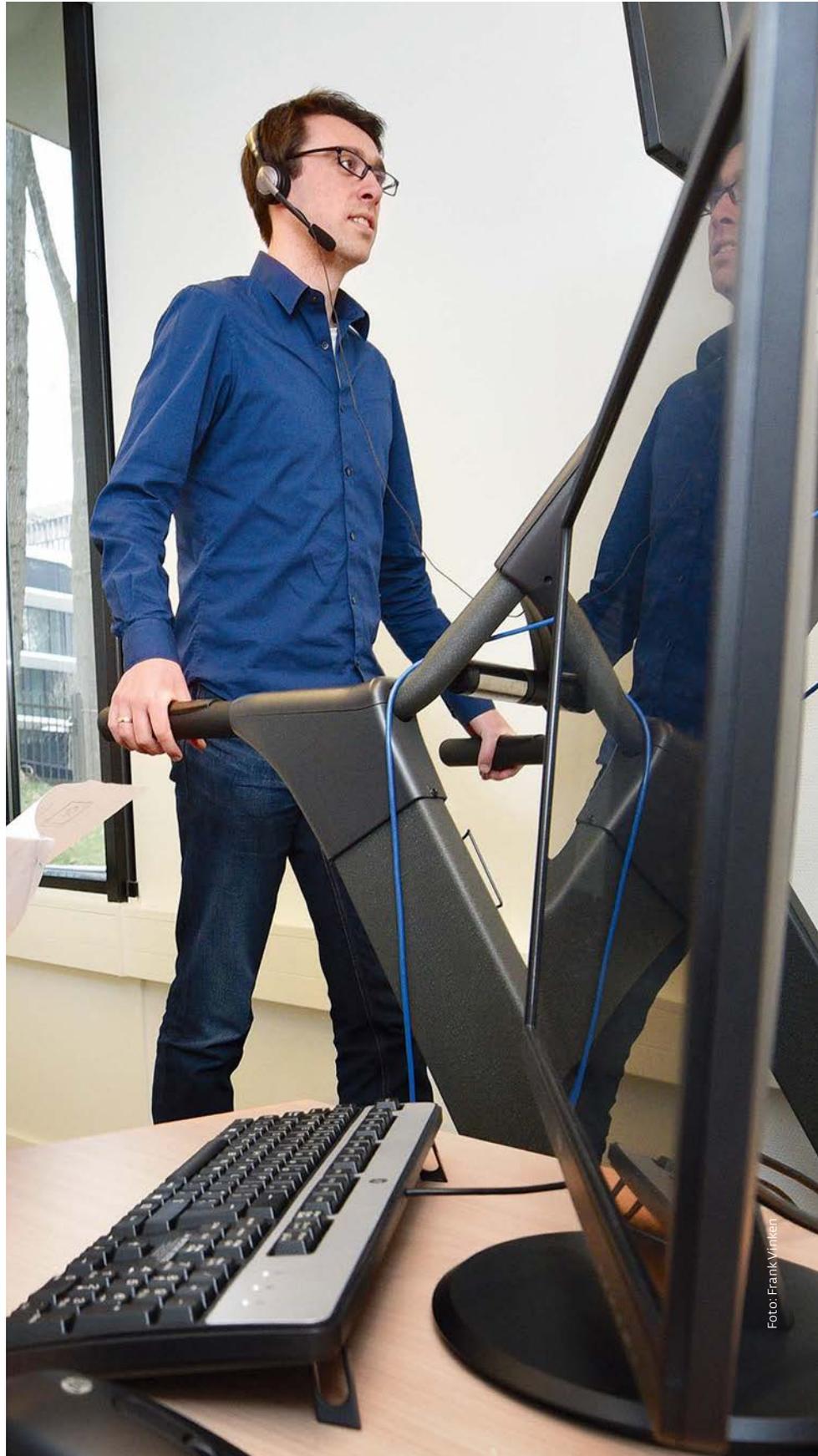
Augenbewegungen zunehmend. Ein und dieselbe Person kann dann beim Beschreiben unterschiedlicher Szenen höchst flexibel vorgehen – erst recht gibt es Varianzen zwischen verschiedenen Sprechern. Letztlich hilft wahrscheinlich gerade eine gewisse Flexibilität bei Planung und Wortwahl, sich schnell und angemessen auszudrücken.

Trotzdem gelingt es nicht allen Menschen gleichermaßen, schnell und flüssig eine Szene zu beschreiben oder Fragen zu beantworten. „Da kommen viele Faktoren zusammen, etwa wie gut jemand einer bestimmten Sprache mächtig ist“, sagt Meyer. Wer in einer Fremdsprache spricht, wird seine Sätze bei der Planung in kleinere Häppchen zerlegen müssen. Das drosselt die Sprechgeschwindigkeit und zwingt den Sprecher zu kleinen Pausen, die dann gern mit „Ähs“ und „Ahms“ gefüllt werden.

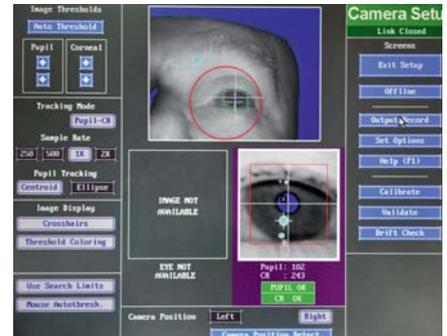
„Von daher dürfen wir nie schlussfolgern, ein ausländischer Mitbürger könne einem Sachverhalt inhaltlich nicht folgen, nur weil er vielleicht länger braucht, um seine Antwort zu formulieren“, warnt die Wissenschaftlerin. „Die Verzögerung liegt nicht in seinem Denken, sondern in seiner Fähigkeit, sich in einer fremden Sprache auszudrücken.“

Antje Meyer nennt noch ein anderes Beispiel aus der Praxis: „Im Unterricht werden Schülern Sätze zugemutet, die sie gar nicht verstehen können, weil sie den nötigen Wortschatz und die Sprachfähigkeit gar nicht besitzen.“ So seien Lehrbücher für Berufsschulen oft in einem Duktus gehalten, wie man ihn in wissenschaftlichen Abhandlungen findet – lange, verschachtelte Sätze, Fachbegriffe und Ähnliches. „Da ist es doch kein Wunder, wenn eine junge Frau, die Friseurin werden will, inhaltlich aussteigt“, kritisiert die Max-Planck-Direktorin. Dabei hätte die Berufsschülerin wahrscheinlich gar keine Mühe, den für sie relevanten fachlichen Zusammenhängen zu folgen, wären diese nur in einer Sprache ausgedrückt, die der ihren entspricht.

Solche Erkenntnisse mögen alltäglich klingen. Doch genau das reizt Antje Meyer. Die Psychologin will wissen,



Sprechzeit im Labor: Mit einer Augenbewegungskamera (rechts) wird genau erfasst, wohin der Proband blickt, bevor er spricht. Normalerweise sollte beim Sprechen jede Ablenkung vermieden werden. Allerdings können Versuchspersonen auf dem Laufband (links) Bilder schneller benennen als diejenigen, die sitzen.



wie Sprache in einem natürlichen Kontext funktioniert. Etwa in normalen Gesprächssituationen, wenn jemand auf das zuvor Gehörte antworten soll. „Man könnte meinen, dass der Zuhörer die Zeit nutzt, in der sein Gegenüber noch spricht, um die eigene Antwort vorzubereiten“, sagt die Forscherin. „Das mag manchmal möglich sein, führt aber dazu, dass das Verstehen leidet.“

Um das zu beweisen, nutzt das Team in Nijmegen wieder die Augenbewegungskamera. Diesmal sitzen zwei Freiwillige vor jeweils einem Monitor, der zwei Reihen von leicht zu benennenden Objekten zeigt. Die Aufgabe ist einfach: Der erste Sprecher benennt die Bilder der oberen Reihe, der zweite die der unteren – und zwar beide nacheinander, also nach dem Prinzip Frage und Antwort.

Während Versuchsperson Nummer eins die erste Zeile „vorliest“, verfolgen die Wissenschaftler die Augenbewegungen des „Antwortenden“. Würde dieser frühzeitig seine Äußerungen vorbereiten, so müssten seine Blicke bevorzugt die untere Reihe suchen. Dem ist aber nicht so. Die Zuhörenden folgen brav den Sprechenden durch die obere Reihe und springen erst kurz vor dem Ende

in die untere. Die zeitliche Überlappung von Zuhören und Vorbereiten der eigenen Aussage beträgt weniger als eine halbe Sekunde.

DIE FORSCHERIN HÄLT WENIG VOM MULTITASKING

Ein weiteres Experiment liefert die Erklärung. Zeigt man Probanden Bilder von Dingen, die sie benennen sollen, und spielt gleichzeitig über Kopfhörer vorgelesene Wörter ein, können sich die Versuchspersonen später in der Regel nicht an das Gehörte erinnern. Einzige Ausnahme bilden Wörter, die eingespielt werden, während die Probanden „Krickelbilder“ sehen, die keine benennbaren Objekte enthalten. Macht der Sprecher dann – gezwungenermaßen – eine Pause, dringen die gehörten Inhalte zu ihm durch. Also werden unsere Kapazitäten fürs Zuhören durch das Planen eigener Äußerungen stark beeinträchtigt.

„Daher ist es auch überhaupt keine gute Idee, wenn wir unsere Studierenden dazu auffordern, sich während eines Vortrags kluge Fragen zu überlegen“, sagt Meyer. Stattdessen sollte die Devise lauten: Erst zuhören, dann eige-

ne Gedanken und Fragen formulieren – alles andere geht auf Kosten der Aufnahmefähigkeit. „Eigentlich dürften Sie jetzt auch nicht mitschreiben“, sagt Antje Meyer in Richtung der Journalistin, die sich während des Recherchegesprächs eifrig Notizen macht.

Überhaupt hält die Psycholinguistin wenig vom Multitasking, denn mehr als einer Tätigkeit kann die volle Aufmerksamkeit nun einmal nicht gelten. Einzige Ausnahme: moderater Sport. Probanden, die auf einem Laufband gehen, benennen Bilder schneller als Versuchspersonen, die auf einem Stuhl sitzen. „Das hat uns überrascht“, verrät die Wissenschaftlerin. „Wir waren ursprünglich davon ausgegangen, dass das Laufen von den Sprachaufgaben ablenkt und diese deshalb schlechter gelöst werden.“

Doch scheint die Bewegung vor allem zu aktivieren und damit für erhöhte Aufmerksamkeit zu sorgen. „Es ist außerdem wahrscheinlich, dass die Probanden die Ablenkung bemerken und sich daher mehr Mühe geben, die Aufgabe gut zu lösen“, sagt Meyer und fügt schmunzelnd hinzu: „Deswegen stehen wir hier auch, während wir uns unterhalten.“ >



Suche nach Vielfalt: Antje Meyer und ihr Team legen Wert darauf, unterschiedliche Probandengruppen für ihre Experimente zu gewinnen. Wie Lesen das Sprechen beeinflusst, untersucht eine Studie bei Mitgliedern der Dalits, der „Unberührbaren“ in Indien. So können Analphabeten und Lesekundige aus derselben sozialen Schicht verglichen werden.



Doch Vorsicht – Bewegung ist nicht gleich Bewegung, und nicht immer vermag sie die Konzentration zu steigern. Derzeit führt das Nijmegener Team Testreihen durch, in denen das Laufband langsamer rotiert, als es der normalen Schrittgeschwindigkeit der Probanden entspricht. Diese müssen nun aufpassen, dass sie nicht straucheln – und sind daher gezwungen, Kapazitäten von der Sprachaufgabe abzuziehen.

Tests mit Versuchspersonen vor Bildschirmen und auf Laufbändern bilden jedoch nur die relativ artifizielle Situation im Labor ab. Damit lassen sich zwar grundsätzliche Fragen zur Aufmerksamkeit und zur Sprachplanung klären. Ein echter Dialog besteht jedoch aus weit mehr als aus aneinandergereihten Begriffen, die mal gleichzeitig, mal nacheinander benannt werden. Vielmehr interagieren die Gesprächspartner und müssen spontan auf das Gesagte antworten. Dabei zieht der Sprecher einerseits die Aufmerksamkeit auf sich, sodass der Zuhörende sich in dieser Zeit keine eigene Aussage überlegen kann. Andererseits wird die Satzplanung durch das zuvor Gesagte unterstützt, weil der Antwortende Gedanken und Satzteile des Vorredners aufgreifen kann. Fragt der eine etwa: „Was ist dein Lieblingsessen?“, gewinnt der andere Zeit, wenn er antwortet: „Mein Lieblingsessen? – Das ist Pizza.“

Um Gesprächssituationen zu simulieren, die den natürlichen Bedingungen einer Unterhaltung näher kommen, entsteht zurzeit im Kellergeschoss des Max-Planck-Instituts für Psycholinguistik ein Virtual-Reality-Labor. Hier sollen Probanden künftig statt mit Bildschirmen mit dreidimensional projizierten Avataren sprechen, und zwar in möglichst natürlicher Umgebung, etwa in einem virtuellen Café. Das hat den Vorteil, dass die Wissenschaftler die Sprechmuster der Avatare bis in kleinste Detail steuern

können und die virtuellen Mitspieler nie unvorhergesehen agieren.

Um Sprache in ihrem natürlichen Kontext zu untersuchen, ist es wichtig, eine möglichst große Bandbreite an Probanden zu beteiligen. „Das meiste, was wir bisher über die Psychologie der Sprache zu wissen glauben, wurde ausschließlich mit Studierenden untersucht, von denen die meisten auch noch weiblich waren“, sagt Antje Meyer. Von einer derart elitären Gruppe auf die Allgemeinbevölkerung zu schließen, das ist ein Ding der Unmöglichkeit.

LESEN BEEINFLUSST DIE VISUELLE AUFMERKSAMKEIT

Die Wissenschaftlerin investiert daher viel Energie darin, heterogene Probandengruppen für ihre Experimente zu gewinnen – so etwa im niederländischen Wissenschaftsmuseum NEMO in Amsterdam. Teilnehmer waren hier vor allem Eltern mit ihren Kindern. Das bot die Chance, die Dialogexperimente mit Menschen vorzunehmen, die eine andere Altersstruktur haben und aus unterschiedlichen sozialen Gruppen stammen. Noch sind diese Daten nicht ausgewertet. Doch unabhängig vom wissenschaftlichen Ergebnis freut sich Meyer über das enorme Interesse der Museumsbesucher an ihrer Arbeit.

Ein weiteres Forschungsfeld der Abteilung „Psychologie der Sprache“ benötigt in ganz besonderem Maße Probanden jenseits der Universitäten: Untersuchungen zur Sprachverarbeitung bei Analphabeten. Diesem Thema widmet sich Falk Huettig, der in der Abteilung eine eigene Forschungsgruppe leitet. Konkret befasst er sich mit der Frage, ob und wie sich die Lesefertigkeit auf Gehirn, Sprache und Denken auswirkt.

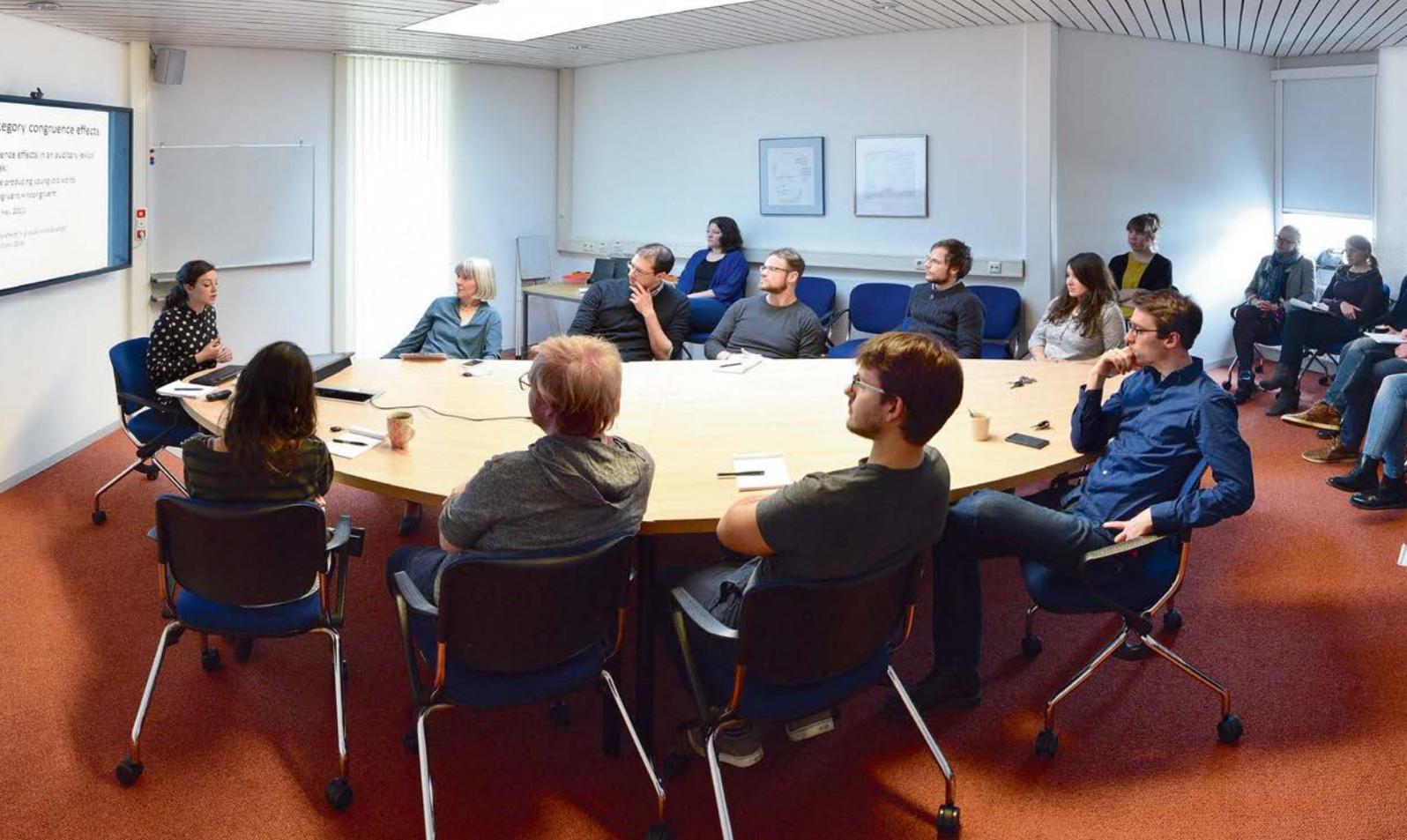
Zu den Vorreitern auf diesem Gebiet zählt der französische Neurowissenschaftler Stanislas Dehaene, der am

Collège de France in Paris forscht. Dehaene hat im Jahr 2010 gemeinsam mit internationalen Kollegen eine viel beachtete Arbeit im Fachjournal SCIENCE publiziert. Darin verglichen die Forscher die Hirnaktivität von Analphabeten mit der von Probanden, die des Lesens und Schreibens mächtig waren. Mithilfe bildgebender Verfahren beobachteten die Wissenschaftler, dass Lesen das Netzwerk für gesprochene Sprache im Gehirn beeinflusst und dieses beim Anblick geschriebener Sätze aktiviert wird.

Zudem fanden die Forscher heraus, dass bei Lesenden bestimmte Areale im Gehirn nicht nur durch geschriebene Wörter, sondern auch durch Bilder und Symbole stärker angeregt werden als bei Analphabeten. Die Region, die dafür zuständig ist, Gesichter zu erkennen, erschien jedoch verkleinert, verglichen mit jener im Gehirn der Analphabeten. Sollte sich das Lesen gar negativ auf die Gesichtserkennung auswirken?

Das Problem an Dehaenes Untersuchung: Probanden kamen teilweise aus sehr unterschiedlichen Kulturkreisen, sogar von unterschiedlichen Kontinenten. Darüber hinaus vergleicht die Studie eine relativ kleine Gruppe von Analphabeten mit Menschen, die erst als Erwachsene Lesen und Schreiben gelernt haben. Dazu kam eine sehr gemischte Kontrollgruppe Lesender, die zu einem Gutteil aus Akademikern bestand. „Da spielen zu viele Variablen hinein, etwa erhebliche Unterschiede in allen Bereichen der Allgemeinbildung, aber auch die soziale Herkunft der Probanden“, kritisiert Huettig. „Der unterschiedliche Wortschatz, aber auch Armut und schlechter Zugang zu medizinischer Grundversorgung können sich auf die Netzwerke im Gehirn auswirken.“

Der Psychologe hat sich daher auf die Suche nach Studienteilnehmern gemacht, die aus ein und derselben sozi-



alen Gruppe stammen und ihm so erlauben, den Einfluss der Lesefähigkeit direkt zu untersuchen. Und er wurde fündig: in einem kleinen Dorf im indischen Bundesstaat Uttar Pradesh bei Mitgliedern der Dalits – im Westen oft als „Unberührbare“ bezeichnet –, einer traditionell benachteiligten Schicht in der indischen Gesellschaft. „In dieser Gruppe finden wir sowohl Lese- und Schreibkundige als auch Analphabeten, die aber alle denselben sozialen und kulturellen Hintergrund haben“, sagt Falk Huettig und ergänzt: „Dazu kommt, dass wir hier sogar die Gelegenheit haben, mit einer großen Probandenzahl Längsschnittstudien durchzuführen, um zu testen, wie es sich auf Sprache, Denken und Gehirn auswirkt, wenn Analphabeten lesen lernen.“

Möglich sind diese Untersuchungen nur durch die Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern an der Universität Lucknow in der Hauptstadt von Uttar Pradesh. Dort können Huettig und seine Kollegen auch funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT) nutzen, um Vorgänge im Gehirn der Probanden zu untersuchen.

Um es vorwegzunehmen: Dehaenes Hypothese, die Lesefertigkeit wirke sich möglicherweise negativ auf die Ge-

sichtserkennung aus, konnte das Team um Falk Huettig nicht bestätigen. Ebenso wenig ließ sich der vermeintlich positive Effekt auf die phonologische Verarbeitung von gesprochener Sprache verifizieren. Dafür entdeckten die Wissenschaftler eine Reihe anderer Unterschiede zwischen beiden Gruppen – auch in Sachen visueller Aufmerksamkeit. So schnitten etwa Probanden, die des Lesens und Schreibens mächtig sind, bei bestimmten Suchaufgaben besser ab als Analphabeten.

VORHERSAGEN HELFEN, EFFIZIENT ZU SPRECHEN

Sollten die Versuchspersonen etwa aus einem Gewimmel verschiedener Hühner das grüne oder das dünne Huhn herausfinden, dann waren die Lesekundigen deutlich schneller. Besonders gut schnitten sie ab, wenn sich die gesuchten Tiere in einem Bildausschnitt rechts der Mitte befanden. Das könnte mit der waagrechten Leserichtung zusammenhängen, vermutet Falk Huettig.

Auch Stanislas Dehaene hatte bereits festgestellt, dass Lesende horizontal, also zeilenförmig ausgerichtete visuelle Reize besser verarbeiten können als Analphabeten.

Huettig entdeckte außerdem, dass die Lesefertigkeit bei seinen Versuchspersonen direkte Auswirkungen auf die Sprachverarbeitung hat. So können Analphabeten offensichtlich schlechter vorhersehen, was ihr Gegenüber als Nächstes sagen wird. Dafür nutzten die Forscher wieder ein Kamerasystem, um Augenbewegungen zu registrieren. Der Proband hört einen Satzanfang und sieht auf einem Monitor Bilder, die für einen möglichen weiteren Satzverlauf stehen. Für seine Hindi sprechenden Probanden wählte Huettig eine Aufgabe, die dem spezifischen Satzbau dieser Sprache gerecht wird.

Auf ein deutsches Beispiel übertragen, könnte das Experiment so aussehen: Man spielt „Ich esse ...“ ein, während auf dem Bildschirm ein Kuchen und ein Stuhl erscheinen. Wer nun beim Hören im Geiste den weiteren Satzverlauf vorausdenkt, wird eher auf den Kuchen schauen als auf den Stuhl. Während bei Lesenden der Blick tatsächlich bevorzugt zum Kuchen wandert, bevor das entsprechende Wort ertönt, konnten Forscher in der Gruppe der Analphabeten keine derartige Tendenz ausmachen. Deren Augenbewegungen richteten sich erst auf den Kuchen, wenn dieser erwähnt wurde. Die



Analphabeten konnten zwar den Zusammenhang zwischen gehörtem Satz und gesehenen Symbolen herstellen, sie hatten aber große Schwierigkeiten, den Satzverlauf vorherzusagen.

Mehr noch: Die Fähigkeit zur Vorhersage steigt mit zunehmender Lesefertigkeit, wie weitere Untersuchungen der Max-Planck-Forscher ergaben. Sie verglichen dazu etwa Menschen mit Dyslexie, also einer Leseschwäche, und durchschnittlich begabte Leser. Oder Zweitklässler, die gut lesen konnten, und Zweitklässler, die sich damit schwer taten. Und sogar bei Studenten machte sich der Effekt bemerkbar: Wer besser liest, sagt auch gesprochene Sprache sicherer und schneller voraus.

Im Alltag macht sich dieser Unterschied allerdings kaum bemerkbar. Schlechtere Leser antworten nicht zwingend langsamer auf eine Frage als gute – sofern sie dieser inhaltlich gewachsen sind. Und auch Analphabeten sind in ihrer alltäglichen Konversation nicht unbedingt eingeschränkt. Es scheint, als sei Vorhersage nur eine von vielen Strategien, die das Gehirn nutzt, um Sprache und Sprechen möglichst effizient zu machen.

Was Falk Huettig aus den Untersuchungen aber auf jeden Fall mitnimmt,

Erst zuhören, dann diskutieren: Nach diesem Grundsatz gestaltet Antje Meyer Sitzungen mit ihrem Team. Aus ihren Experimenten weiß sie, dass Menschen nicht gleichzeitig einem Vortrag folgen und eigene Gedanken formulieren können.

ist eine Bestätigung dafür, dass Lesen einen signifikanten Einfluss auf die Informationsverarbeitung und die Netzwerke im Gehirn hat. Wie sich das genauer darstellt, hofft er, durch die fMRT-Untersuchungen herauszufinden, die er derzeit mit seinen Kollegen in Indien vornimmt – bei Analphabeten, die gerade lesen lernen.

Wovon der Wissenschaftler jedoch heute schon überzeugt ist: „Unsere Untersuchungen und Befunde haben großes Potenzial für die Dyslexieforschung.“ Bisher sei viel darüber berichtet worden, was Menschen mit Dyslexie nicht oder schlechter können als Lesefertige. Was davon aber nun Ursache und was Effekt der Leseschwäche ist, sei bei dieser Herangehensweise kaum auszumachen.

Zieht man jedoch den Vergleich zwischen Analphabeten und Personen mit Lese-Rechtschreib-Schwäche, so könne man die Gemeinsamkeiten der beiden Gruppen als Ergebnis des Nichtlesens einordnen. Das grenze wiederum die Suche nach den Ursachen ein.

„Als erste Konsequenz unserer Ergebnisse kann man Dyslektikern nur raten, möglichst viel zu üben – auch wenn es schwerfällt“, sagt Huettig. „Denn je mehr das Lesen trainiert wird, umso mehr verbessert sich beispielsweise auch die visuelle Aufmerksamkeit.“ Und damit sind wissenschaftliche Neugier und reine Grundlagenforschung wieder mitten im Alltag angekommen – dort, wo Sprache unter natürlichen Bedingungen stattfindet. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Menschen können in Gesprächen nicht gleichzeitig zuhören und eine Erwiderung planen. Stattdessen entwickelt sich der Inhalt des Gesagten oft erst beim Sprechen.
- Die Fähigkeit zu lesen hat einen signifikanten Einfluss auf die Informationsverarbeitung im Gehirn.
- Wer lesen kann, schneidet etwa bei Suchaufgaben in Bildern besser ab und kann Inhalte von Gesprächen besser vorhersehen.

GLOSSAR

Bildgebende Verfahren: In den Neurowissenschaften ermöglichen sie es mithilfe spezieller Techniken, dem Gehirn sozusagen bei der Arbeit zuzuschauen. Zu den am häufigsten angewendeten Methoden gehören die Positronen-Emissions-Tomografie (PET), die mittels Verteilung einer schwach radioaktiv markierten Substanz Schnittbilder vom Gehirn ermöglicht, sowie die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT).

Dyslexie: Internationaler Begriff für eine intelligenzunabhängige Leseschwäche. Er wird meist gleichbedeutend mit Legasthenie verwendet. Kennzeichen sind schwere, anhaltende Probleme mit dem Lesen- und Schreibenlernen auf der Wortebene.

Funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT): Mit diesem Verfahren lassen sich Durchblutungsänderungen von Hirnarealen sichtbar machen. Anhand dieser Veränderungen können Wissenschaftler testen, welche Bereiche des Gehirns bei bestimmten Aufgaben besonders aktiv sind.





Foto: MPI für Informatik

Der digitale Bildreporter

Die Hörfassung eines Films lässt Blinde die Handlung verstehen. Könnte nicht ein Computer diese Übersetzungsarbeit leisten? **Anna Rohrbach**, Wissenschaftlerin am **Max-Planck-Institut für Informatik** in Saarbrücken, und ihr Mann **Marcus Rohrbach**, bis vor Kurzem ebenfalls am Institut beschäftigt, arbeiten genau daran. In Zukunft soll ein Rechner automatisch Filmbeschreibungen generieren und vorlesen.

TEXT **TIM SCHRÖDER**

Der Pianist“, „Gandhi“, „Men in Black“, „X-Men“. Anna Rohrbach besitzt ziemlich viele Videos und jede Menge Blockbuster. Gut 200 DVDs stehen säuberlich aufgereiht in ihrem Büroregal. Während die meisten anderen Menschen Videos sammeln, um sich gemütliche Fernsehabeude auf dem Sofa zu machen, bedeuten die Filme für Anna Rohrbach vor allem einen Haufen Arbeit.

Anna Rohrbach ist Informatikerin. Gemeinsam mit ihrem Mann Marcus versucht sie, dem Computer etwas beizubringen, das zunächst unmöglich klingt: Videos anzuschauen und zu beschreiben, was auf dem Bildschirm passiert. Für den Menschen ist das trivial. „Schatz, komm mal schnell, jetzt wird es spannend“, hat wohl jeder schon

einmal durch die Wohnung gerufen. Wenn der Gangster im Film die Waffe hebt oder die Polizei den Killer durch dunkle Gassen jagt, dann weiß der Mensch, was abgeht.

Aber ein Computer? Der muss zunächst einmal erkennen können, dass eine Pistole, die jemand in der Hand hält, eine Waffe und keine Fernbedienung ist, dass eine Umarmung nichts mit Nahkampf zu tun hat oder dass es beim Sportfechten nicht um Leben und Tod geht. Schon das ist eine Herausforderung. Dazu muss die bewegte Szene in eine verständliche und grammatikalisch saubere Sprache übersetzt werden.

Anna und Marcus Rohrbach sind Spezialisten für „Computer Vision“, für automatische Bilderkennung. Auf diesem Fachgebiet gab es in den vergangenen zehn Jahren große Fortschritte. >

Der Videokoch: Marcus Rohrbach hat am Max-Planck-Institut für Informatik eine Küche eingerichtet und mit Videokameras ausgestattet. Die Kochszenen, die er hier dreht, kann ein von ihm entwickeltes Computerprogramm beschreiben.



Lernende Software: Marcus Rohrbach hat dem Computerprogramm beigebracht, verschiedene Tätigkeiten in der Küche zu erkennen, indem er Helfer die Szenen zunächst beschreiben ließ. Hier assistiert ihm die Doktorandin Siyu Tang.

Computer können heute auf Fotos Gesichter erkennen und verschiedenen Personen zuordnen. Auch Landschaftsaufnahmen können sie richtig interpretieren. Rotes Licht, Segel, horizontale Linien? Na sicher: ein Sonnenuntergang am Meer. „Eine bewegte Filmszene korrekt in klaren Worten zu beschreiben ist aber etwas ganz anderes“, sagt Anna Rohrbach.

BILDBESCHREIBUNGEN FÜR BLINDE SIND EINE ANWENDUNG

Die Wissenschaftlerin forscht am Saarbrücker Max-Planck-Institut für Informatik. Auch Marcus Rohrbach hat dort bis vor Kurzem gearbeitet, ist jetzt aber für eine Postdoc-Stelle an die University of California in Berkeley gewechselt. Doch hält er einen Draht zu den Kollegen nach Saarbrücken. Das Projekt beschäftigt aber nicht nur die Rohrbacks. Die Idee entstand nämlich aus einer Zusammenarbeit zwischen der Max-Planck-Arbeitsgruppe von Bernt Schiele, in der Anna und Marcus Rohrbach arbeiten beziehungsweise gearbeitet ha-

ben, und dem Fachbereich Computational Linguistics der Universität des Saarlandes, der von Manfred Pinkal geleitet wird.

Den Forschern schweben gleich mehrere Anwendungen vor. Zukünftig könnte der Computer Filmbeschreibungen für Blinde automatisch generieren – und vorlesen. Heute ist das noch recht aufwendig, weil die Offstimme für einen Film von einem Profi eingesprochen werden muss. Anwendungsfall Nummer 2 besteht darin, Videos auf Internetportalen automatisiert zu beschreiben. Anhand solcher Kurztexte könnten Internetnutzer schneller relevante Videos finden, ohne sich wie bisher durch etliche Filmchen klicken zu müssen, bis sie endlich das passende gefunden haben.

Etwas futuristisch mutet Anwendung Nummer 3 an. Wenn ein Computer Filmszenen interpretieren und in Worte fassen kann, versteht er auch Geschehnisse in der realen Welt und kann sie entsprechend in Worten wiedergeben. Daher halten es die Rohrbacks für möglich, dass Serviceroboter oder

Handy-Apps schon in einigen Jahren menschliche Handlungen begreifen und sich in natürlicher Sprache mit dem Menschen unterhalten. Sie könnten beispielsweise beantworten, wo der Besitzer seine Brille hat liegen lassen, oder mit ihm diskutieren, was er zum Abendessen kochen sollte – weil sie ja beobachtet haben, was in den Tagen zuvor aufgetischt wurde.

Marcus Rohrbach hat vor etwa fünf Jahren damit begonnen, dem Computer das Beschreiben von Filmen beizubringen – und sich dem großen Ziel in kleinen Schritten genähert. „Man kann ja nicht erwarten, dass eine Software sofort die ganze Welt mit sämtlichen vorstellbaren Szenen erkennt“, erklärt der Wissenschaftler. „Wir haben uns deshalb zunächst auf eine überschaubare Szene beschränkt – auf eine Küche, in der wir Personen beim Kochen gefilmt haben.“ Dafür ließ Marcus Rohrbach im Max-Planck-Institut eigens eine moderne Küche mit Ceranfeld und schicken Einbauschränken einrichten.

Der Unterschied zur Küche zu Hause ist, dass einige Kameras aufnehmen,

» Der wichtigste Schritt: Marcus Rohrbach musste das Wissen über Bewegungen und Objekte mit Beschreibungen der Aktivitäten verknüpfen – ein komplexer Vorgang, der in mehreren Stufen abläuft.

was passiert. Im ersten Schritt filmte er Probanden bei verschiedenen Tätigkeiten – dem Schälen einer Orange, beim Kochen von Spaghetti oder beim Gurkeschneiden. Diese Filmsequenzen ließ er anschließend von Helfern mit natürlichen Worten beschreiben – zum Beispiel: „Ein Mann steht in der Küche und schneidet eine Gurke mit dem Messer.“

Da diese Beschreibungen frei und ohne eine feste Struktur sind, wurden die Daten zusätzlich nach einem festen Muster mit Bemerkungen versehen – annotiert. So mussten die Helfer Informationen zu den folgenden Kategorien notieren: Objekt (etwa Gurke), Aktivität (zum Beispiel Schälen oder Schneiden), Werkzeug (Messer), Ort (Tischplatte) und Ziel (Salatschüssel). „Diese Kategorien sind essenziell, wenn man eine Aktivität umfassend beschreiben

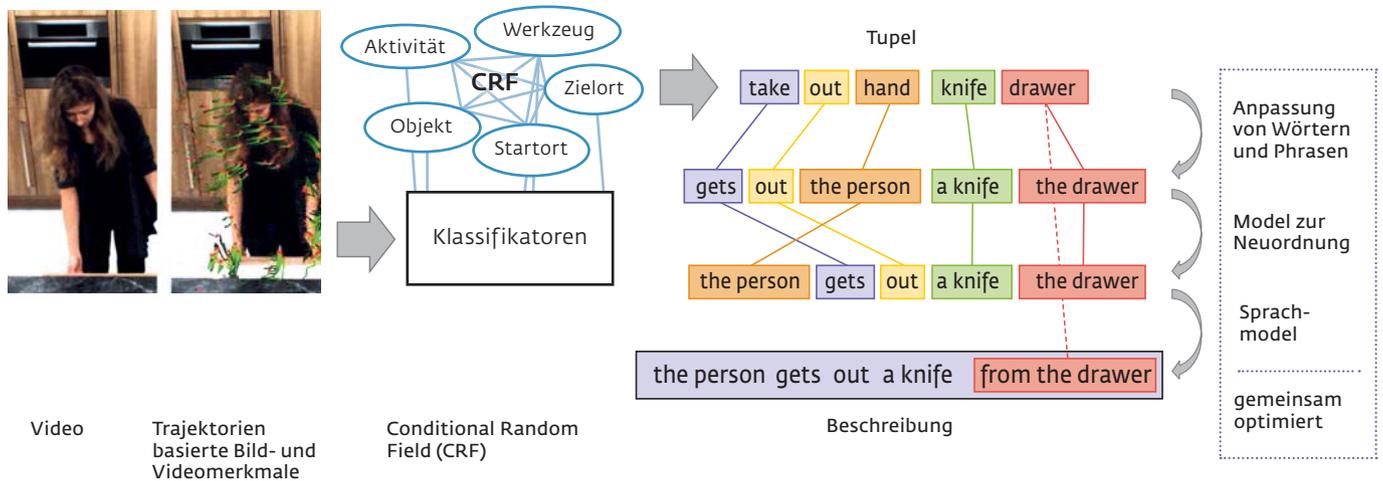
will“, erklärt Marcus Rohrbach, „denn sie enthalten die wesentlichen Satzbestandteile wie etwa Verb oder Objekt; zum Beispiel: Mann – Messer – schneiden – Gurke.“

EINE SOFTWARE VERFOLGT DIE BEWEGUNGEN

Doch bevor ein Computer Objekte beschreiben kann, muss er zunächst lernen, wie diese aussehen. Zu diesem Zweck setzte Marcus Rohrbach Software ein, die verschiedene Parameter automatisch lernt. Dabei handelt es sich um Algorithmen, die mit einem Trainingsdatensatz gefüttert werden – in diesem Falle den Videofilmen aus der Küche. Der Algorithmus lernt nach und nach, wie ein Objekt aussieht, und kann es später wiedererkennen. Am Ende ermit-

telt er Wahrscheinlichkeitswerte, etwa: „Das Objekt entspricht zu 94 Prozent einer Banane.“

Zum Erkennen einer Videosequenz gehört es natürlich auch, Bewegungen korrekt zu erfassen und zu interpretieren. Eine Hand, die sich rhythmisch bewegt, könnte schneiden oder eine Möhre schälen oder Eischnee schlagen. Der Computer muss all das unterscheiden können. Um ihm Bewegungen beizubringen, nutzte Marcus Rohrbach eine sogenannte Trackingsoftware, eine Verfolgungssoftware. Diese kann in einem Videobild die Bewegung einzelner Pixel nachverfolgen und damit den gesamten Bewegungsablauf gewissermaßen einfrieren. Auch diese Trackingdaten speiste der Forscher in die Algorithmen ein, sodass der Computer Schneiden oder Schälen zu unterscheiden lernte. >



In einem Video ermittelt die Software von Marcus Rohrbach zunächst Bild- und Videomerkmale entlang der Trajektorien (Bewegungsbahnen). Klassifikatoren identifizieren dann Objekte, Aktivitäten, Werkzeuge sowie Start- und Zielort. Diese Parameter setzt ein Wahrscheinlichkeitsfeld, englisch Conditional Random Field (CRF), miteinander in Beziehung. So entsteht ein Tupel, dessen Wörter und Phrasen zunächst an übliche Formulierungen angepasst und dabei etwa mit Artikeln versehen werden. Die Begriffe werden dann neu geordnet und schließlich von einem Sprachmodell um die fehlenden Präpositionen zur endgültigen Beschreibung ergänzt.



Links Anna Rohrbach hat gut 200 DVDs gesammelt, um einer Software beizubringen, Videos beliebigen Inhalts zu beschreiben.

Rechts Um eine Szene korrekt zu beschreiben, muss eine Software auch den Subtext der Bilder erfassen. Sonst hält sie eine Umarmung für einen Ringkampf oder umgekehrt und kann auch nicht zwischen Sportfechten und einem Duell unterscheiden.

„Wir sprechen bei solchen Algorithmen von Klassifikatoren“, sagt Marcus Rohrbach. Je nach Wahrscheinlichkeitswert gewichten diese verschiedene Möglichkeiten und wägen ab, um welche Handlung – Schneiden oder Rühren etwa – oder welches Objekt es sich handelt – eine Gurke oder Banane. Dabei muss der Klassifikator schon bei der Identifikation von Objekten eine Fülle von Merkmalen berücksichtigen wie Farbe, Form oder Größe.

EIN WAHRSCHEINLICHKEITSFELD BEWERTET DIE TÄTIGKEIT

Außerdem ist es wichtig, das Zusammenspiel verschiedener Objekte und Aktivitäten zu modellieren. Zum Beispiel ist es unwahrscheinlich, dass jemand eine Gurke im Topf mit einem Löffel schält; man erwartet eher, dass jemand Zucchini im Topf mit einem Kochlöffel umrührt, auch wenn beide Szenarien auf den ersten Blick visuelle Ähnlichkeiten haben.

Um welche Bewegung oder Tätigkeit es sich am wahrscheinlichsten handelt, bewertet Marcus Rohrbach in einem sogenannten Conditional Random Field, einem Wahrscheinlichkeitsfeld. Das Conditional Random Field stellt

Beziehungen zwischen Objekt, Aktivität, Werkzeug und Ort her – es bildet eine Gruppe von Parametern, die Fachleute als Tupel bezeichnen; in diesem Falle ein Objekt-Aktivität-Werkzeug-Ort-Tupel. Auch das Conditional-Random-Field-Modell wird mithilfe von Trainingsdaten angelernt.

Dann folgte der wichtigste Schritt. Marcus Rohrbach musste das Wissen über Bewegungen und Objekte mit Beschreibungen der Aktivitäten verknüpfen – ein komplexer Vorgang, der in mehreren Stufen abläuft. Zunächst erkennt der Klassifikator die Wahrscheinlichkeit einzelner Elemente. Wenn eine Person eine Zwiebel auf das Schneidebrett legt, handelt es sich für den Klassifikator mit einer hohen Wahrscheinlichkeit um die folgenden Elemente: „Hand“, „legen“, „stellen“, „Zwiebel“, „Brett“, „Tischplatte“. Begriffe mit geringen Wahrscheinlichkeiten wie „Löffel“ oder „Topf“ schließt der Klassifikator aus. Dann berechnet das Conditional Random Field, welches Tupel die Szene am besten beschreibt, in diesem Fall etwa: Hand, legen, Zwiebel, Brett.

„Um dann aus den Tupeln natürliche Sprache zu erzeugen, haben wir Software verwendet, wie man sie ähnlich von Übersetzungsprogrammen

kennt, die beispielsweise vom Englischen ins Deutsche übersetzen“, sagt Marcus Rohrbach. Diese bringen die zu einem Tupel verknüpften Begriffe zunächst in eine sinnvolle Reihenfolge wie etwa: „Hand legt Zwiebel auf Brett.“

Anschließend werden die Begriffe nach einem sogenannten Sprachmodell durch Artikel und eventuell fehlende Präpositionen ergänzt, sodass sich ein semantisch sinnvolles Konstrukt ergibt, ein Satz mit vernünftigen Aufbau wie: „Die Hand legt die Zwiebel auf das Brett.“ Zudem werden bestimmte Begriffe durch üblichere Formulierungen ersetzt, die dem Sprachmodell eher vertraut sind – etwa „Hand“ durch „Person“. So entsteht Rechenstrich für Rechenstrich eine grammatikalisch korrekte Formulierung wie: „Eine Person legt eine Zwiebel auf das Brett.“

DETAILLIERT – ODER SCHLICHT ZUSAMMENGEFASST

„Über das Küchenprojekt habe ich vor einiger Zeit meine Doktorarbeit geschrieben“, erzählt Marcus Rohrbach. „Dieses Verfahren zur Videobeschreibung hat ziemlich gut funktioniert und die Szenen korrekt in Sprache übersetzt.“ Anna Rohrbach hat es dann so



erweitert, dass es Szenen unterschiedlich detailliert oder abstrahiert beschreiben kann, was vorher noch keiner anderen Forschergruppe gelungen ist. So ist die Methode in der Lage, einzelne Arbeitsschritte wie: „Eine Frau holt Spaghetti aus dem Schrank, nimmt einen Topf aus der Schublade und füllt ihn mit Wasser“ detailliert aufzuzählen oder die Tätigkeit schlicht in einem einzigen Satz zusammenzufassen: „Eine Frau kocht Spaghetti.“

Doch hatte dieses erste Projekt seine Grenzen, sagt Marcus Rohrbach. Immerhin war das Videoanalyse-System auf das Umfeld Küche beschränkt. Zudem empfand er das ganze System als zu komplex. Der Weg von der Szenenanalyse über die Tupel und die semantische Verknüpfung der Begriffe bis hin zum fertigen Satz erschien ihm zu weit. „Deshalb haben wir uns zwei neue Ziele gesetzt: Wir wollen Szenen aus jedem beliebigen Umfeld analysieren können und außerdem den Weg von der Szenenanalyse zur Sprachausgabe auf einen Schritt reduzieren.“

An dieser Stelle kommt Anna Rohrbachs inzwischen stattliche Filmsammlung ins Spiel. Bis heute hat sie 202 Videofilme und 118000 Videoclips analysiert. Jeder dieser Clips hat etwa

eine Beschreibung mit meist einem natürlichen Satz. Mit diesen Datensätzen trainiert sie ein ganz besonderes Software-Werkzeug – ein Long Short-Term Memory (LSTM).

DREI KLASSIFIKATOREN ERKENNEN EINE SZENE

Dabei handelt es sich um ein künstliches neuronales Netz, das wie alle Varianten dieser Software die Funktionsweise des Gehirns nachahmt. Ein LSTM erinnert sich jedoch über einen längeren Zeitraum an bereits verarbeitete Daten als andere künstliche neuronale Netzwerke und verarbeitet die Eingabedaten daher auch zuverlässig, wenn die entscheidenden Signale wie bei der Erkennung von Szenen oder Sprache in unregelmäßigen Abständen eintreffen.

Sofern man ein solches LSTM ordentlich mit Trainingsdaten gefüttert hat, kann es aufgrund seiner Erfahrung selbst darüber entscheiden, welche Information relevant ist und im System gespeichert werden muss oder welche gelöscht werden kann. Das LSTM kann damit die Relevanz von Informationen einschätzen. LSTM werden heute oft für die Übersetzung von Sprache oder die Erkennung von Handschrift eingesetzt.

Ein LSTM ist das Herz von Anna Rohrbachs Arbeit. Es verknüpft unmittelbar die visuelle Information, den Input, mit der Sprachanalyse – und reduziert die Videobeschreibung damit tatsächlich auf einen Schritt. Auch das LSTM arbeitet mit Wahrscheinlichkeiten. Als Input dienen ihm visuelle Daten, die wiederum von Klassifikatoren geliefert werden. Um eine Szene vollständig zu erkennen, setzt die Wissenschaftlerin drei Klassifikatoren ein. Diese geben Auskunft über folgende drei Aspekte: die Tätigkeit, die Objekte im Bild und den Ort, an dem sich die Szene abspielt.

Anna Rohrbach greift dabei durchaus auf Entwicklungen anderer Arbeitsgruppen zurück – etwa einen Klassifikator, den Forscher des Massachusetts Institute of Technology in den USA entwickelt haben. Der Klassifikator wurde mit vielen Daten darauf trainiert, Umgebungen zu erkennen – eine Küche, ein Schlafzimmer oder ein Restaurant etwa. Wie gehabt, liefern die Klassifikatoren Wahrscheinlichkeitswerte, die zu einem Wahrscheinlichkeitsvektor – zu einer Art Wolke von Wahrscheinlichkeitswerten – verknüpft werden, ehe sie in das LSTM eingespeist werden.

Das LSTM generiert aus dieser visuellen Information unmittelbar die



Das neuronale Netzwerk (LSTM) von Anna Rohrbach beschreibt Videosequenzen wie etwa eine Tanzszene genauer als andere Computerprogramme, aber noch nicht so gut wie die Worte eines Menschen.

Sprachdaten. „Eine Stärke des LSTM ist, dass es aus einer Sequenz von Worten auf die folgenden Worte schließen kann“, sagt Anna Rohrbach. Es kann sehr gut entscheiden, welches Wort auf ein Wort folgen muss, und irrelevante Daten aussortieren. Das LSTM fügt Artikel und Präpositionen hinzu und liefert so sinnvolle, natürliche Sprache.

„Im Grunde ist das wie beim Menschen. Wir merken uns ja auch, welche Worte wir gerade gesagt haben, und formulieren auf dieser Basis den nächsten Satzteil.“ Anna Rohrbachs LSTM hat also so etwas wie ein Sprachgefühl. Es benötigt keine Tupel mehr, mit deren Hilfe Worte zunächst aneinandergereiht und dann Stück für Stück zu einem vollständigen Satz zurechtgeschoben werden müssen.

Letztlich entscheidet das LSTM anhand von Wahrscheinlichkeiten, wel-

ches Wort als nächstes folgt. Und das funktioniert offenbar sehr gut. In einem Vergleich mit anderen Videobeschreibungsmethoden schnitt Anna Rohrbachs Verfahren am besten ab. Unter anderem konnte das LSTM eine Szene treffender und differenzierter beschreiben als die übrigen Methoden.

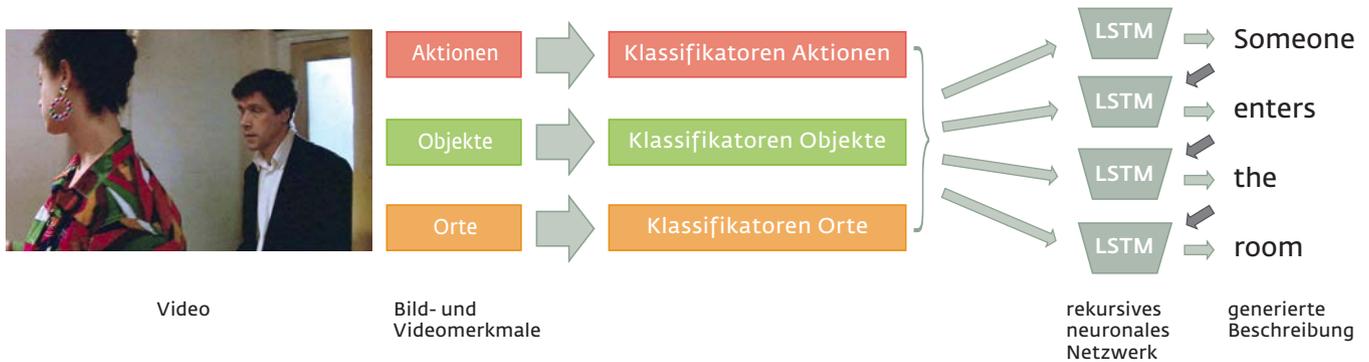
DAS LSTM ANALYSIERT GENAUER ALS ANDERE VERFAHREN

Ein Beispiel: In einer Filmszene führt jemand eine blonde Frau in weißem Kleid auf die Tanzfläche und beginnt, sie zu drehen. Anna Rohrbachs LSTM beschrieb die Szene so: „Jemand trägt ein weißes Kleid, lächelt und hat weißes Haar.“ Eine andere Software interpretiert die Szene deutlich dürftiger: „Jemand schaut jemanden an.“ Die Software des dritten Teams, mit der Anna Rohrbach ihr LSTM verglichen hat, liefert gar ein unfreiwillig komisches Ergebnis für die gegenseitigen Blicke: „Jemand schaut jemanden an. Jemand schaut jemanden an.“

Der Vergleich macht deutlich, dass das LSTM die Szene genauer analysiert als andere Verfahren. Zugleich offenbart das Beispiel, dass Anna Rohrbachs System noch Schwächen hat. Denn dass es sich um eine Szene im Tanzsaal handelt, verrät das LSTM nicht. „Tatsächlich arbeitet das Verfahren noch nicht hundertprozentig. Immer wieder gibt es grammatikalische Fehler. Und in manchen Fällen werden vor allem komplexe Szenen nicht richtig erkannt“, sagt die Forscherin.

Ein Beispiel ist eine Sequenz, in der ein Jugendlicher in Sportkleidung davonläuft. Für Blinde wurde die Szene manuell wie folgt beschrieben: „Jemand läuft in Sportkleidung eine Tribüne hoch und dann davon.“ Das LSTM interpretiert: „Jemand läuft auf der Straße.“

Vor allem abstrakte Inhalte kann das LSTM derzeit also noch nicht erkennen. Information, die sozusagen zwischen den Zeilen steckt. Die Tatsache, dass der Jugendliche davonläuft, bleibt dem LSTM verborgen, zudem ignoriert es, dass der Junge eine Tribüne hinaufrennt. „In an-



Die Software von Anna Rohrbach lernt Aktionen, Objekte und Orte in einem Video mithilfe von Klassifikatoren, die jeweils für eine dieser Kategorien spezialisiert sind, zu erkennen. Aus diesen Bildmerkmalen erzeugt ein rekursives neuronales Netzwerk (LSTM) in mehreren Zyklen Wort für Wort eine Beschreibung des Videos.

deren Fällen konnte das System nicht erkennen, dass eine Person vor der Polizei davonläuft“, sagt Anna Rohrbach.

„Es ist schwierig, dem Computer beizubringen, solche inhaltlichen Bezüge herzustellen.“ Genau das aber will Anna Rohrbach in nächster Zeit erreichen. Interessant wäre es für sie auch, den Computer zu lehren, die Emotionen der Schauspieler zu deuten. Denn damit ließe sich eine ganz neue Ebene erreichen, welche die Videobeschreibung noch deutlich verbessern könnte.

Wann ihre Videobeschreibung marktreif ist, kann sie noch nicht genau abschätzen. „Doch die Fortschritte in der Bilderkennung waren in den vergangenen Jahren sehr beachtlich. Manchmal geht es also sehr schnell“, sagt Rohrbach. Festlegen will sie sich aber nicht. Der Gewinn für die Nutzer wäre riesig. Videos ließen sich im Handumdrehen für Blinde betexten. Und Internetnutzer könnten die Inhalte von Videos in Windeseile überfliegen – kurz und knapp – „Eine Frau kocht Spaghetti“ – oder im Langtext mit allen Details. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Im vergangenen Jahrzehnt gab es im Bereich „Computer Vision“, der automatischen Bilderkennung, große Fortschritte. So etwa können Rechner heute auf Fotos Gesichter erkennen und verschiedenen Personen zuordnen.
- Die Beschreibung von Filmszenen dagegen ist viel komplexer.
- Dennoch sollen Computer zukünftig automatisch Filmbeschreibungen erzeugen und diese vorlesen.
- Um dieses Ziel zu erreichen, arbeiten Forscher am Max-Planck-Institut für Informatik mit einem besonderen Softwarewerkzeug, dem Long Short-Term Memory (LSTM).

GLOSSAR

Algorithmus: Eindeutige Handlungsvorschrift zur Lösung eines Problems oder einer Klasse von Problemen. Algorithmen bestehen aus endlich vielen Einzelschritten und lassen sich zur Ausführung etwa in einem Computerprogramm implementieren.

Computer Vision: Der Begriff bedeutet „maschinelles Sehen“ und beschreibt die computergestützte Lösung von Aufgabenstellungen, die sich an den Fähigkeiten des menschlichen visuellen Systems orientieren. Anwendungen liegen etwa in industriellen Produktionsprozessen oder in der Verkehrstechnik.

Long Short-Term Memory (LSTM): Ein künstliches neuronales Netz, das die Funktionsweise des Gehirns nachahmt und sich über einen vergleichsweise langen Zeitraum an bereits verarbeitete Daten erinnert. Mit Trainingsdaten gefüttert, kann ein LSTM schließlich selbst entscheiden, welche Information relevant ist und im System gespeichert werden muss.

Energieschleuder im Herzen der Milchstraße

H.E.S.S.-Teleskope registrieren kosmische Strahlung, die vom schwarzen Loch beschleunigt wird



Die Erde ist ständig dem Bombardement hochenergetischer Teilchen aus dem All ausgesetzt. Dabei handelt es sich um Protonen, Elektronen und Atomkerne, die man als kosmische Strahlung bezeichnet. Wenn die Teilchen beschleunigt werden, entsteht energiereiches Gammalicht. Dieser Prozess findet auch im Zentralbereich unserer Milchstraße statt. Das dabei ausgesandte Gammalicht beobachten Forscher – unter anderem aus dem Max-Planck-Institut für Kernphysik – seit einem Jahrzehnt mit den H.E.S.S.-Teleskopen in Namibia. So hatten sie bereits vor einigen Jahren eine starke kompakte Quelle sowie ein ausgedehntes Band diffuser Gammastrahlung mit Teraelektronenvolt-Energie (TeV = 10^{12} eV) nachgewiesen. Nun

identifizierten die Wissenschaftler jedoch zum ersten Mal eine Strahlungsquelle im Bereich von Petaelektronenvolt-Energie (PeV = 10^{15} eV): Dabei handelt es sich vermutlich um das Sagittarius A* genannte supermassive schwarze Loch im Herzen der Galaxis; das Massemonster wäre demnach mit der kompakten Quelle im Teraelektronenvolt-Bereich identisch. Zudem könnte sein Gammalicht mit Molekülwolken in Wechsel treten und so auch das diffuse Gammalicht-Band erzeugen. Andere Objekte wie einen Supernovaüberrest, einen Pulsarwindnebel und einen kompakten Sternhaufen schließen die Astronomen als Energieschleudern bei Petaelektronenvolt aus. (www.mpg.de/10384481)

Außerirdische Teilchenbeschleuniger: Die künstlerische Darstellung zeigt Prozesse, die zur Entstehung der hochenergetischen Gammastrahlung beitragen. Protonen (blaue Kugeln), die vom schwarzen Loch Sagittarius A* (helle Quelle im Zentrum) beschleunigt werden, wechselwirken mit Molekülwolken der Umgebung. Dabei werden unter anderem Pionen erzeugt, die fast sofort zu Gammastrahlungsphotonen zerfallen (gelbe Wellen). Im Hintergrund: Aufnahme der Milchstraße im sichtbaren Licht.

Bluttest für Tuberkulose

Biomarker sollen in Zukunft das Ausbruchsrisiko einer Tuberkulose voraussagen. Zwischen 1,5 und zwei Millionen Menschen sterben jedes Jahr an Tuberkulose. Die Erkrankung gehört damit zu den Infektionskrankheiten mit der weltweit höchsten Sterberate. Doch nicht jeder, der mit dem Erreger infiziert ist, erkrankt: Bei weniger als zehn Prozent der Infizierten bricht die Krankheit tatsächlich aus – bei wem, ließ sich aber bislang nicht vorhersagen. Ein internationales Wissenschaftlerteam, an dem auch Forscher des Max-Planck-Instituts für Infektionsbiologie in Berlin beteiligt waren, hat nun einen Tuberkulose-test entwickelt, der einen Ausbruch der Krankheit bei Infizierten mit etwa 75-prozentiger Wahrscheinlichkeit prognostizieren kann. Die Ergebnisse zeigen, dass in Immunzellen des Bluts von Tuberkulose-infizierten Menschen, die später an Tuberkulose erkranken, bestimmte Gene aktiv sind. Dieses typische Aktivitätsmuster potenzieller Tuberkulosepatienten soll der Bluttest künftig entdecken. Er könnte dann das Auftreten der Krankheit schon über ein Jahr vor dem Ausbruch vorhersagen. Jetzt soll in klinischen Studien getestet werden, ob der Ausbruch der vorhergesagten Krankheit mit einer gezielten Therapie verhindert werden kann. (www.mpg.de/10376990)



Frühzeitige Prognose: Moleküle im Blut sollen Ärzten künftig verraten, ob ein Mensch an Tuberkulose erkranken wird.

Kompass im Auge

Einige Säugetiere können sich möglicherweise ähnlich wie Vögel am Erdmagnetfeld orientieren

Füchse fangen Mäuse erfolgreicher, wenn sie ihre Beute in Nordost-Richtung anspringen. Für diese erstaunliche Beobachtung haben Forscher des Max-Planck-Instituts für Hirnforschung möglicherweise eine Erklärung gefunden. Sie haben in der Netzhaut mehrerer Säugetierarten lichtempfind-

liche Moleküle gefunden, die auch Änderungen des Erdmagnetfelds registrieren können. Demnach besitzen Hund, Wolf, Bär, Fuchs und Dachs das sogenannte Cryptochrom 1, katzenartige Raubtiere wie Katzen, Löwen und Tiger dagegen nicht. Bei Affen kommt das Molekül zum Beispiel im Auge von Orang-Utans und manchen Makaken vor. Die Forscher vermuten, dass die Tiere das Cryptochrom 1 ähnlich wie manche Vögel zur Wahrnehmung des Erdmagnetfeldes benutzen. Auch Zugvögel besitzen Cryptochrom-Moleküle im Auge, mit denen sie die Neigung der Magnetfeldlinien zur Erdoberfläche wahrnehmen können. Die Moleküle reagieren jedoch nur dann auf das Magnetfeld, wenn sie gleichzeitig durch Licht angeregt werden. Zusätzlich besitzen Vögel auch noch mikroskopisch kleine eisenhaltige Magnetpartikel in Zellen zur Orientierung am Magnetfeld. Ein solcher Magnetit-basierter Magnetsinn kommt auch bei manchen Säugetieren wie den Graumullen vor. (www.mpg.de/10319313)



Verräterisches Magnetfeld: Füchse können ihre Beute möglicherweise anhand winziger Veränderungen im Erdmagnetfeld orten.

Erpresser am Verhandlungstisch

Teilnehmer großer politischer Konferenzen können ein Lied davon singen: Immer wieder scheitern Verhandlungen an unkooperativem, egoistischem Verhalten einzelner Unterhändler. An den jahrelangen, oft ergebnislosen Verhandlungen über ein Klimaabkommen lässt sich dies genauso studieren wie an den aktuellen Schwierigkeiten, die EU-Länder auf gemeinsame Quoten bei der Flüchtlingsaufnahme festzulegen. Wissenschaftlern der Max-Planck-Institute für Meteorologie in Hamburg und für Evolutionsbiologie in Plön zufolge liegt dies daran, dass sich Menschen bevorzugt von Repräsentanten vertreten lassen, die eine erpresserische Verhandlungsstrategie verfolgen: den eigenen Anteil an einer Gemeinschaftsaufgabe mög-

lichst niedrig halten, durch standhaftes „Mauern“ andere zwingen, das Defizit auszugleichen, und am Ende vom Erreichen des gemeinsamen Ziels am meisten profitieren. Die Forscher haben dies mithilfe eines Klimaspiels und eines spieltheoretischen Modells herausgefunden. 40 Prozent der Teilnehmer agierten demzufolge erpresserisch. Die Ergebnisse geben Anlass zu gedämpftem Optimismus: Erpressung führt schlussendlich zum Verhandlungserfolg. Alle profitieren davon, wenn das Verhandlungsziel erreicht wird: die Erpresser sehr viel, die Erpressten nur wenig – aber immerhin etwas. Trotz dieser machiavellistischen Strategie könnte der Klimawandel auf diese Weise abgewendet werden. (www.mpg.de/10347494)



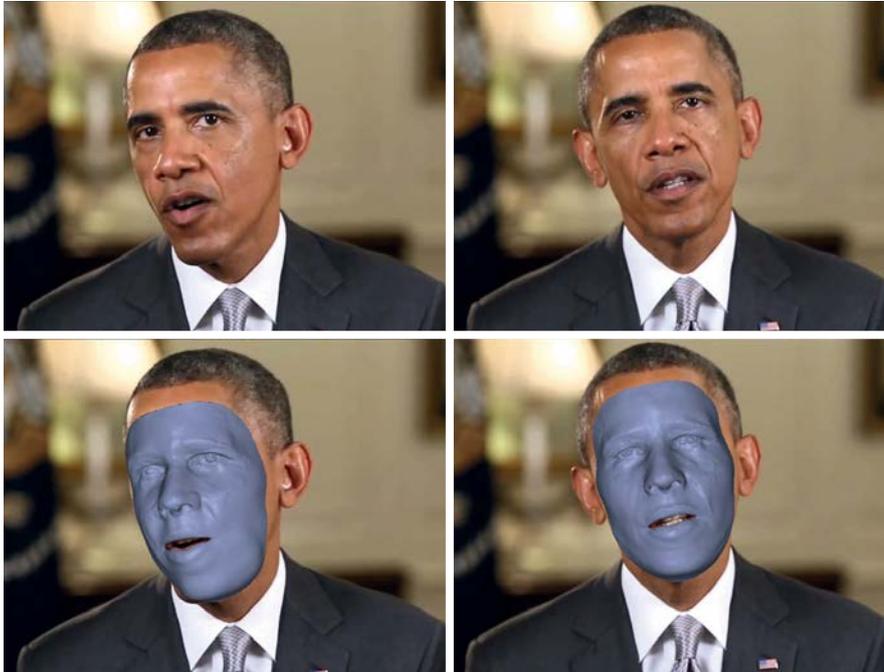
Politische Konferenzen sind immer wieder Schauplätze erbittert geführter Verhandlungen, bei denen oft erst in letzter Minute eine Einigung erreicht wird.

Animieren leicht gemacht

Saarbrücker Informatiker erstellen anhand von Videos realistische Gesichtsmodelle für Filme

Die Filmindustrie baut heute nicht mehr allein auf die Kunst der Schauspieler – nach dem Dreh werden deren Gesichter oft noch am Rechner bearbeitet. Für solche Computeranimationen benötigt man dreidimensionale Gesichtsmodelle, so-

genannte *face rigs*, die bislang über aufwendige Messverfahren erstellt und von Hand in die Filmszenen eingebaut werden. Christian Theobalt, Leiter der Gruppe „Graphics, Vision and Video“ am Saarbrücker Max-Planck-Institut, hat gemeinsam mit seinem Team eine neue Methode entwickelt, die diesen Vorgang wesentlich beschleunigt. Dabei reichen dem Team Aufnahmen einer Standard-Videokamera. Mit mathematischen Methoden schätzen die Forscher die nötigen Parameter wie Gesichtsgeometrie, Reflexionseigenschaften und Szenenbeleuchtung ab. Auf dieser Basis können sie ein individuelles Gesicht am Rechner so realitätsgetreu rekonstruieren, dass es wie ein vollständiges *face rig* funktioniert. Allein über mathematische Verfahren verpassen die Informatiker den Protagonisten dann unterschiedliche Gesichtsausdrücke. (www.mpg.de/10360478)



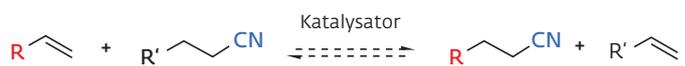
Passende Mienen: Anhand gewöhnlicher Videoaufnahmen wie hier von US-Präsident Barack Obama erstellen Forscher des Max-Planck-Instituts für Informatik realistische Gesichtsmodelle für Computeranimationen und Avatare. Mithilfe der Modelle können sie die Gesichter der Personen auch andere Emotionen ausdrücken lassen, als im Ausgangsvideo zu sehen waren.

Eine Hammer-Tauschaktion

Mit einer sicheren Variante der Hydrocyanierung entwickeln Chemiker ein vielseitiges Werkzeug

Chemie ist wie ein Werkzeugkasten. Um medizinische Wirkstoffe, Kunststoffe oder Farben herzustellen, greifen Chemiker zu Reagenzien wie Handwerker zu ihren Arbeitsgeräten. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Kohlenforschung präsentieren nun ein neues chemisches Werkzeug, das einen wichtigen Syntheseschritt, die Hydrocyanierung, ermöglicht und ungefährlicher ist als die gängige Methode. Das ist in etwa so, als würde ein Hammer erfunden, mit dem man sich nicht auf die Finger klopfen kann. Mithilfe eines geeigneten Katalysators ist es den Forschern gelungen, eine Cyanidgruppe – eine funktionelle Gruppe, die viele Möglichkeiten für die Weiterverarbeitung einer Substanz schafft – von einem Molekül auf ein anderes zu übertragen. Dabei übernimmt das Spendermolekül eine Doppelbindung seines Reaktionspartners. Für diesen Syntheseschritt, der unter anderem bei

der Nylonherstellung gebraucht wird, benötigt man bislang giftige Blausäure (Cyanwasserstoff). Die neue Reaktion lässt sich zudem noch sehr leicht umkehren. Der neue Hammer im chemischen Werkzeugkasten verursacht also nicht nur keine blauen Daumen mehr, er taugt zugleich auch als Zange. (www.mpg.de/10309105)

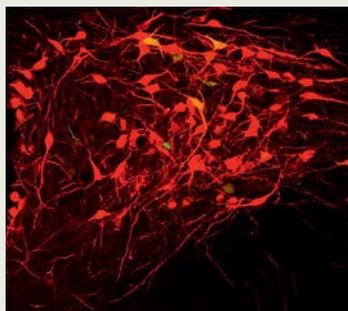


Molekularer Tausch: Chemiker des Max-Planck-Instituts für Kohlenforschung haben einen sicheren Weg gefunden, die Cyanidgruppe (CN) von einem Molekül (R') auf ein anderes (R) zu übertragen. Dabei übernimmt das Spendermolekül eine Doppelbindung(=) seines Reaktionspartners.

Kuscheln gegen den Schmerz

Schnelle Geburt – die aus dem Griechischen stammende Bezeichnung für Oxytocin weist bereits auf eine wichtige Aufgabe des Hormons hin: Bei der Geburt löst es eine Kontraktion der Gebärmuttermuskulatur aus und leitet die Wehen ein. Da Oxytocin auch sonst soziale Bindungen reguliert, wird es gemeinhin als Kuschelhormon bezeichnet. Das Hormon wird ausschließlich im Hypothalamus des Gehirns gebildet und unter anderem über die Hirnanhangsdrüse ins Blut abgegeben. Forscher des Max-Planck-Instituts für medizinische Forschung in Heidelberg haben nun im Hypothalamus von Ratten eine kleine Gruppe von etwa 30 Nervenzellen entdeckt, die die Ausschüttung von Oxytocin ins Blut koordiniert und auch Zellen im Rückenmark anregt. Die Nervenenden der Zellen reichen bis ins Rückenmark, wo sie Oxytocin als Neurotransmitter ausschütten. Wie die Wissenschaftler nun festgestellt haben, verringert das Hormon auf diese Weise das Schmerzempfinden. Die Forscher gehen davon aus, dass es diese Zellen auch im menschlichen Gehirn gibt. Vermutlich besteht das menschliche Oxytocin-System jedoch aus mehr Zellen. (www.mpg.de/10329354)

Gezielte Hormongabe: Eine kleine Gruppe Oxytocin-produzierender Nervenzellen (rot) koordiniert die Ausschüttung von Oxytocin in Blut und Rückenmark.

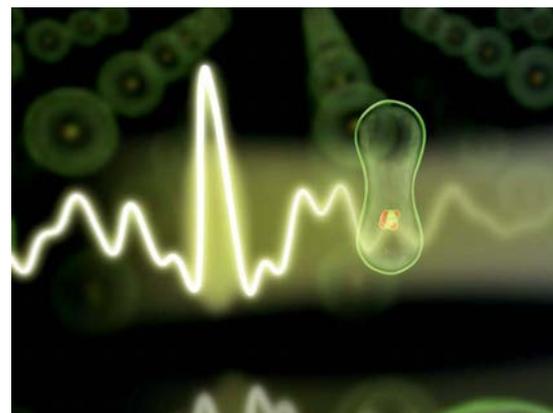


Fotos: Christian Hackenberger (oben), Eliava et al., 2016 (unten)

Elektronen im Reaktionstest

Sichtbare Attosekundenblitze messen die verzögerte Reaktion von Elektronen auf Licht

Licht könnte der Motor sein, der Elektronik künftig noch schneller macht. So verfolgen Physiker das Ziel, mit Lichtpulsen elektrische Ströme in Schaltkreisen zu steuern, und zwar im Takt der Lichtfrequenz. Erkenntnisse von Eleftherios Goulielmakis und seinem Team am Max-Planck-Institut für Quantenoptik dürften es ermöglichen, Elektronen mit Licht künftig genauer zu kontrollieren. Wie die Wissenschaftler herausfanden, folgen Elektronen den elektromagnetischen Kräften des Lichts nicht unmittelbar, sondern mit einer Verzögerung von 100 Attosekunden. Die Reaktionszeit bestimmten die Forscher, indem sie Elektronen in Kryptonatomen mit Attosekundenpulsen sichtbaren Lichts anregten. Wenn man diese Verzögerung berücksichtigt, lassen sich möglicherweise noch präzisere optoelektronische Bauelemente entwickeln. (www.mpg.de/9961189)



Elektronische Reaktionszeit: Attosekundenblitze sichtbaren Lichts ermöglichen es, die Verzögerung zu messen, mit der Elektronen wegen ihrer Trägheit auf das anregende Licht reagieren. Die eigentümliche Form der Lichtwelle ergibt sich, weil der Attosekundenpuls aus Licht unterschiedlicher Wellenlänge geformt wird.

Immungene vom Neandertaler

Frühmenschen stärkten die Abwehrkräfte von *Homo sapiens*

Wer in fremden Ländern unterwegs ist, hat oft mit Infektionen zu kämpfen. Der Grund: Das Immunsystem trifft dort auf ihm unbekannte Krankheitserreger. Genauso ging es dem modernen Menschen, als er vor rund 50 000 Jahren aus Afrika nach Europa einwanderte. Offenbar profitierten die Migranten damals von Bewohnern, die schon lange vor ihnen dort lebten: Sie vermischten sich mit den schon seit 200 000 Jahren in Europa lebenden Neandertalern und übernahmen Genvarianten, die sie widerstandsfähiger gegen die örtlichen Krankheitserreger machten. Genanalysen von Forschern des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig haben ergeben, dass heute le-

bende Menschen außerhalb Afrikas drei Immunproteine von anderen Frühmenschen geerbt haben: zwei von Neandertalern, eines von Denisovamenschen – einer weiteren Frühmenschenform. Bei den Immunproteinen handelt es sich um sogenannte Tolllike-Rezeptoren, die auf der Oberfläche von Immunzellen sitzen und Bestandteile von Bakterien, Pilzen und Parasiten aufspüren. Die Genvarianten der Frühmenschen reagieren bei Kontakt mit Krankheitserregern besonders empfindlich. Die Nachkommen der Einwanderer waren dadurch vor Infektionen besser geschützt. Allerdings macht uns das Erbgut der Frühmenschen heute anfälliger für Allergien. (www.mpg.de/9819624)

Die dunkle Taiga lichtet sich

Forscher prognostizieren als Folge der Erderwärmung mehr Laubbäume in borealen Wäldern

Ein internationales Team um Susanne Tautenhahn vom Max-Planck-Institut für Biogeochemie hat untersucht, wie sich boreale Wälder durch die Erderwärmung verändern. „Infolge

des Klimawandels werden Brände etwa durch Blitzeinschläge häufiger und intensiver, und die natürlichen Regenerationsprozesse geraten aus dem Gleichgewicht“, erläutert Tautenhahn, die inzwischen an der Universität Jena arbeitet. Dadurch wird eine Kette von Ereignissen in Gang gesetzt: Nach einem Brand können sich Nadelbäume schwer wiederansiedeln, weil sich deren relativ große Samen nur begrenzt ausbreiten. Laubbäume haben dagegen kleine Samen, die mit dem Wind weit verbreitet werden. So erobern sie sich nach großflächigen Bränden die Flächen deutlich schneller zurück und setzen sich auch langfristig durch. Mit dem Zurückdrängen der typischen Nadelbäume, die viel Feuchtigkeit in Bodennähe speichern, erhöht sich wiederum die Waldbrandgefahr – ein sich selbst verstärkender Prozess, der das Ökosystem nachhaltig verändert. (www.mpg.de/10305999)

Taiga im Wandel: Durch die Erderwärmung werden Waldbrände in borealen Nadelwäldern zunehmen. Laubbäume, die dort heute nur als Pionierpflanzen vorkommen, könnten sich langfristig durchsetzen.

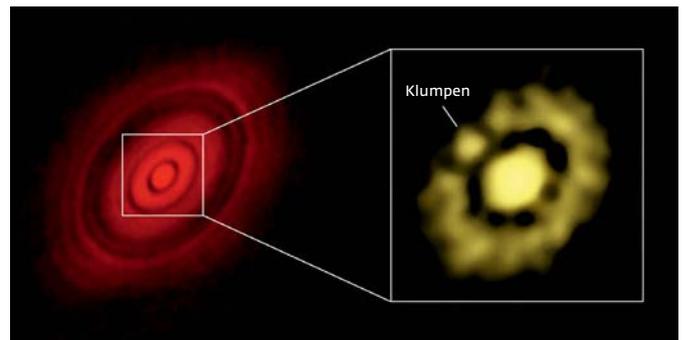


Planetengeburt im Eiltempo

Astronomen beobachten in der Scheibe um den Stern HL Tauri einen Staubklumpen

Planeten entstehen in Scheiben aus Gas und Staub. Das Radioteleskop VLA in New Mexico hat die inneren Partien einer solchen kosmischen Geburtsstätte rund um den jungen Stern HL Tauri so detailreich wie nie zuvor beobachtet. Deutlich sichtbar ist dabei ein riesiger Staubklumpen mit der drei- bis achtfachen Sonnenmasse. Nach Meinung von Forschern des Max-Planck-Instituts für Astronomie bedeutet die Existenz des Klumpens eine Lösung für ein grundlegendes Problem: Wie können Planeten innerhalb der relativ kurzen Zeit entstehen, die sie für ihr Wachstum zur Verfügung haben? Tatsächlich lassen die neuen Bilder einen deutlich schnelleren Geburtsprozess vermuten, denn aus bestimmten Strömungsmustern des Scheibengases resultieren Regionen mit besonders hoher Staubdichte. Und darin kann die Planetenentstehung sehr viel rascher ablaufen als in einer homogenen Scheibe. Äußere Zeichen dafür sind die gefundenen dichten Staubringe, in denen sich Fragmente wie der erwähnte Klumpen bilden können. (www.mpg.de/10394125)

Kosmischer Kreißaal: Die protoplanetare Staubscheibe um den jungen Stern HL Tauri. Links frühere Beobachtungen mit dem ALMA-Observatorium, die durch Lücken getrennte helle Bereiche zeigten; rechts die neuen Beobachtungen mit dem VLA, die zusätzliche Strukturen der inneren Ringe sichtbar machen. Bei dem als Klumpen gekennzeichneten Objekt dürfte es sich um eine Region handeln, in der gerade ein Planet entsteht.

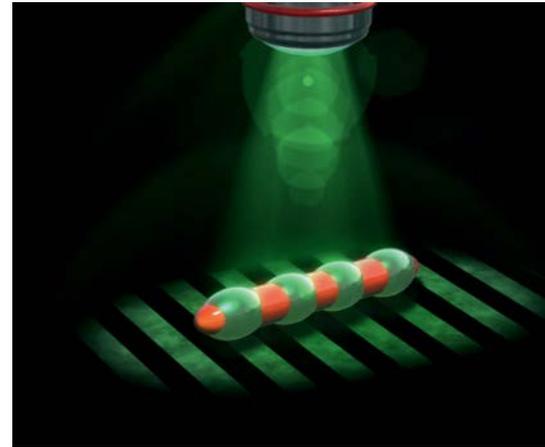


Wimpertierchen als Vorbild

Mikroschwimmer bewegen sich auf ähnliche Weise durch Flüssigkeiten

Wimpertierchen leisten Erstaunliches: Weil sie so winzig sind, erscheint ihnen das Wasser, in dem sie leben, zäh wie Honig. Trotzdem schieben sie sich allein durch die synchronisierte Bewegung Tausender dünnster Filamente an ihrer Außenhaut, den „Wimpern“, durch Gewässer. Forscher des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme in Stuttgart haben nun winzige Roboter entwickelt, die – wie ihr Vorbild – mit bloßem Auge kaum erkennbar sind und sich auf ähnliche Weise durch Flüssigkeiten bewegen. Die Wissenschaftler um Peer Fischer nutzten für ihre Mikroschwimmer Flüssigkristall-

Elastomere, die sich ausdehnen, wenn sie mit grünem Licht bestrahlt werden. So ergibt sich eine peristaltische Bewegung, die das künstliche Wimpertierchen antreibt, wenn grüne Lichtstreifen über dieses wandern. Ein Mini-U-Boot, das wie in der Science-Fiction autonom durch den menschlichen Körper schwimmt, Krankheiten aufspürt und kuriert, lässt sich mit diesem Prinzip zwar nicht verwirklichen. Doch als kleine medizinische Helfer vor einem Endoskop könnte eine weiterentwickelte Form des neuen Stuttgarter Antriebs durchaus zum Einsatz kommen. (www.mpg.de/10310333)



Angeregter Mikroschwimmer: Das Material des knapp einen Millimeter langen Schwimmkörpers ist so gewählt, dass es sich im Licht ausdehnt. Daher laufen wellenförmige Auswölbungen über den Schwimmer und treiben ihn in entgegengesetzter Richtung an, wenn grüne Lichtstreifen über seine Oberfläche fahren.

Not macht Senioren risikobereiter

In den meisten westlichen Ländern sinkt die Neigung, im Alltag Risiken einzugehen, mit zunehmendem Alter. Dagegen bleibt die Risikobereitschaft in Ländern wie Nigeria, Mali oder Pakistan im Alter konstant. Zu diesem Ergebnis kommen Wissenschaftler der Universität Basel und des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung in Berlin. Beim Vergleich von Daten aus 77 Ländern zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Risikobereitschaft und Faktoren wie niedrigem Pro-Kopf-Einkommen, großer Einkommensungleichheit oder hoher Mordrate. Als Grund vermuten die Forscher, dass Menschen in Ländern, in denen die Ressourcen knapp sind, stärker miteinander konkurrieren müssen als Menschen in reichen und sozialen Ländern. (www.mpg.de/9812863)

Kampf um den Wirt

Außer bei „Tom und Jerry“ würde wohl keine Maus auf die Idee kommen, sich freiwillig in der Nähe einer Katze aufzuhalten. Manche Mäuse tun es doch, denn sie werden von Katzen magisch angezogen. Dahinter steckt ein parasitärer Einzeller namens *Toxoplasma gondii*, der das Verhalten der Maus zu seinen Gunsten verändert: Tollkühnere Mäuse werden eher gefressen, was die Ausbreitung des Parasiten begünstigt. Auch andere Parasiten manipulieren das Verhalten ihres Wirts. Doch was geschieht, wenn Parasiten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien oder gar verschiedene Parasitenarten mit entgegengesetzten Zielen einen Wirt befallen? Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Evolutionsbiologie in Plön haben herausgefunden, dass sich Parasiten gegenseitig sabotieren und das Manipulationsprogramm des anderen ausschalten – selbst wenn sie unterschiedlichen Arten angehören. Bei Interessenskonflikten behält den Forschern zufolge immer der Parasit die Oberhand, der sich im infektiösen Stadium befindet und seinen Wirt wechseln muss. Die Forscher haben dies durch die Untersuchung von parasitä-

ren Band- und Fadenwürmern entdeckt, die zunächst Ruderfußkrebse und dann Fische befallen. Dieses Verhalten könnte auch medizinische Konsequenzen haben, wenn beispielsweise Parasiten Manipulationsprogramme von Krankheitserregern unterlaufen und dadurch die Ausbreitung der Erreger erschweren. (www.mpg.de/9941730)



Widerstreitende Ziele: Oft befallen mehrere Parasiten ein und denselben Wirt, wie hier der Bandwurm *Schistocephalus solidus* (grün) und der Fadenwurm *Camallanus lacustris* (blau) einen Ruderfußkrebs. Befinden sich die beiden Parasiten in unterschiedlichen Entwicklungsstadien, versuchen sie, das Verhalten des Krebses in entgegengesetzte Richtung zu beeinflussen.

Trio mit großem Repertoire

Technischer Fortschritt wird oft erst durch neue Materialien möglich, sei es in der Energieversorgung oder in der Informationstechnologie. Mit den Heusler-Verbindungen hat **Claudia Felser**, Direktorin am **Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe** in Dresden, eine Fundgrube für Stoffe aufgetan, die mit vielversprechenden Eigenschaften für diverse Anwendungen aufwarten.

TEXT **PETER HERGERSBERG**

Ob die Energiewende in Deutschland gelingt, hängt nicht nur von den hiesigen Energieversorgern, Verbrauchern und Politikern ab. Zu einem gewissen Teil muss dafür auch die chinesische Regierung ihren guten Willen zeigen – zumindest beim derzeitigen Stand der Technik. Denn China exportiert rund 90 Prozent der Metalle der seltenen Erden. Diese Metalle tragen so altertümlich klingende Namen wie Promethium, Samarium, Neodym oder Dysprosium und finden zahlreiche Anwendungen in der Hochtechnologie. Einige von ihnen machen etwa die besondere Anziehungskraft der stärksten derzeit bekannten Dauermagnete aus. Mit solchen kräftigen Magneten erzeugen die Generatoren moderner Windräder vor allem auf hoher See den Strom, den Deutschland dem Klimawandel entgegensetzt.

So gerieten auch die Hersteller solcher Windkraftanlagen in Aufregung, als die chinesische Regierung 2010 die

Ausfuhr der seltenen Erden drosselte. Auch wenn diese Beschränkung inzwischen wieder aufgehoben ist, sucht die Industrie weltweit nach neuen Quellen. Noch lieber wären ihr Alternativen, um künftig nicht mehr den Launen der Exporteure ausgeliefert zu sein. Zudem sind die Metalle zwar nicht so selten, wie ihr Name nahelegt, aber sie zu gewinnen ist aufwendig und belastet die Umwelt – der offizielle Grund für Chinas Exportschranken.

KOMBINIEREN NACH DEM BAUKASTENPRINZIP

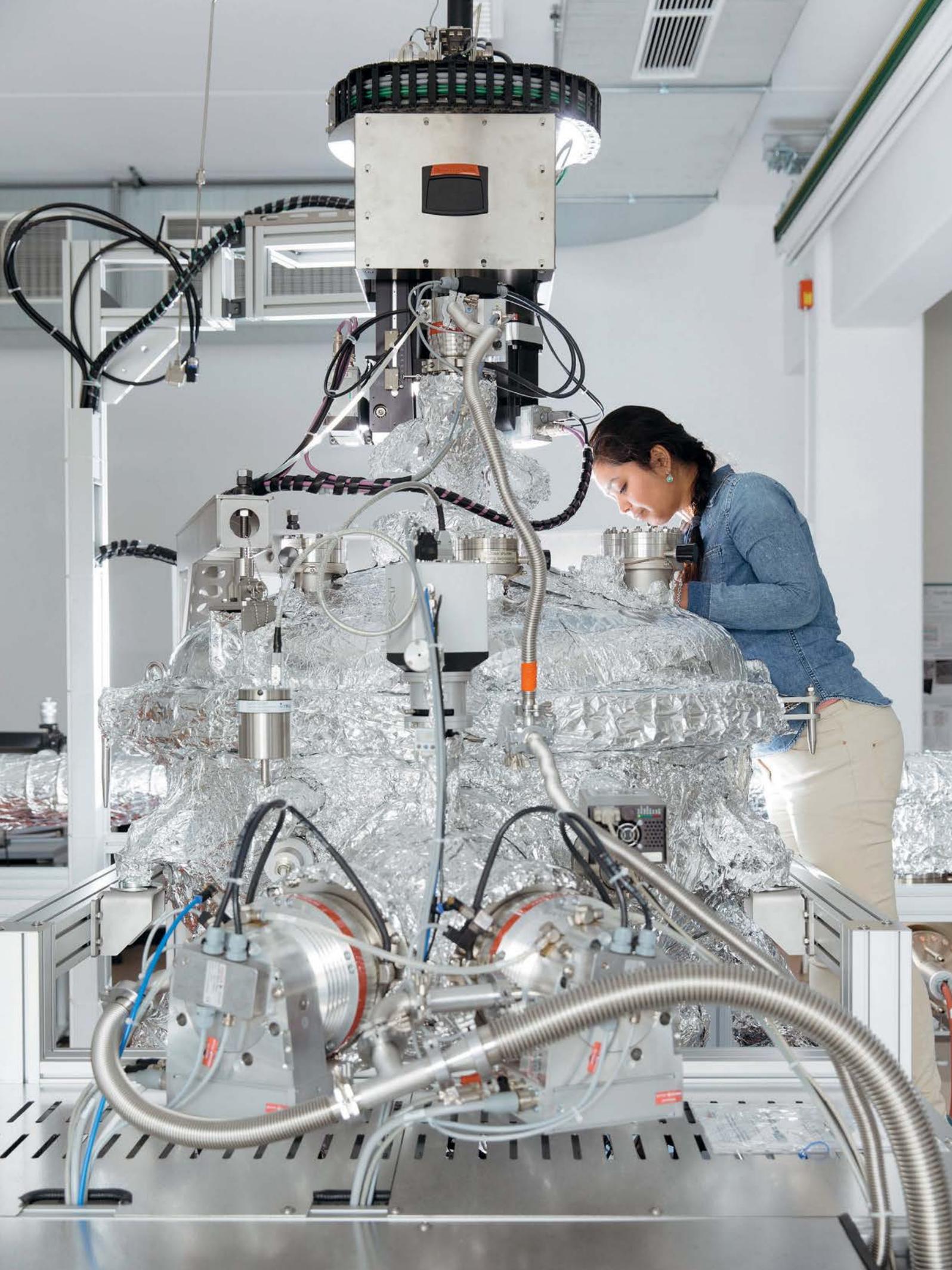
Zumindest was Permanentmagnete aus den umstrittenen Metallen angeht, kann Claudia Felser vielleicht Abhilfe schaffen. Denn starke Dauermagnete ohne seltene Erden zu finden ist ein Ziel, das die Direktorin am Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden mit ihrer Forschung an Heusler-Verbindungen verfolgt. Diese Substanzen enthalten meist drei Metalle, kristallisieren in einer charakteris-

tischen Struktur und sind nach Fritz Heusler benannt. Der deutsche Bergbauingenieur und Chemiker stellte bereits 1903 fest, dass sich eine Verbindung aus Kupfer, Mangan und Aluminium magnetisch, genauer gesagt: ferromagnetisch, verhält, obwohl ihre Bestandteile zumindest diese Form des Magnetismus nicht zeigen.

Danach scherte sich lange kaum jemand um die Verbindungen. Erst in den 1980er-Jahren fanden sie wieder Interesse, weil dann allmählich klar wurde, dass sie viel mehr zu bieten haben als Magnetismus. Inzwischen sind rund 1500 der Verbindungen bekannt, in denen 52 und damit die Mehrzahl der existierenden Metalle auf unterschiedliche Weise zusammengemischt werden.

„Das Gute bei den Heusler-Verbindungen ist, dass man nach dem Baukastenprinzip alle möglichen Elemente kombinieren kann“, sagt Claudia Felser.

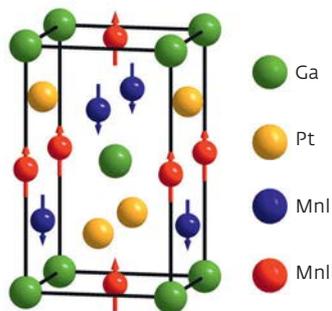
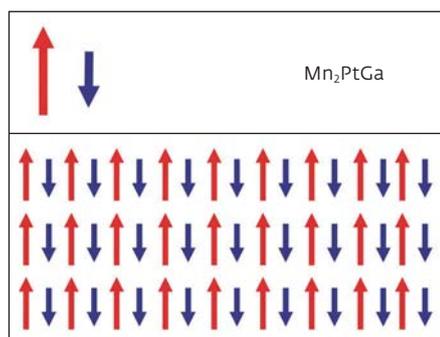
Vielseitige Apparatur: Roshnee Sahoo kontrolliert die Sputteranlage, in der sie und ihre Kollegen dünne Filme verschiedener Materialien erzeugen können.





Oben Claudia Felser und Gerhard Fecher entwickeln ständig Ideen für neue Heusler-Verbindungen.

Unten Im Kristall einer Verbindung von Mangan (Mn), Platin (Pt) und Gallium (Ga) besetzen Manganatome verschiedene Plätze (rechts). Die magnetischen Momente an den unterschiedlichen Manganpositionen orientieren sich entgegengesetzt und halten sich gewissermaßen gegenseitig fest, sodass sich die Substanz nur schwer umpolen lässt. Da es von der einen Mangansorte (rot) mehr gibt als von der anderen (blau), ergibt sich unterm Strich ein kleines magnetisches Moment für die Substanz (links).



einen guten Job. „In der Elektronik sucht man aber nach Materialien mit mehr Einstellmöglichkeiten“, erklärt Claudia Felser. Genau diese Einstellmöglichkeiten bieten die Kombinationen aus drei Elementen. Unter ihnen finden sich etwa auch Halbmetalle, die nicht mit Halbleitern zu verwechseln sind und gerade für die Elektronik der Zukunft gefragt sein könnten – doch dazu später mehr.

Die verschiedenen Arten der Leitfähigkeit treten in Heusler-Verbindungen zudem mit anderen interessanten Eigenschaften verbandelt auf. Diverse Ausprägungen des Magnetismus sind nur einige davon. Manche Heusler-Verbindungen verfügen auch über magneto-optische Fähigkeiten, bieten also die Möglichkeit, die magnetischen Eigenschaften mit Licht zu beeinflussen. Andere zeigen thermoelektrisches Verhalten, bei dem eine Temperaturdifferenz an dem Material eine Spannung erzeugt. Bei ein paar der Substanzen handelt es sich auch um Stoffe, die ein Ge-

Und weil sich die Eigenschaften der einzelnen chemischen Bausteine zu einem großen Teil schon aus ihrer Stellung im Periodensystem der Elemente ableiten lassen, hängt dieses auch gut sichtbar als Grundgesetz ihrer Arbeit hinterm Schreibtisch der Max-Planck-Direktorin.

Beim Zusammenwürfeln der chemischen Bauklötze kommen Materialien mit diversen Eigenschaften heraus, die sowohl für die Wissenschaft als auch für die Technik interessant sind. Und so spricht Felser genauso oft von Patenten,

die sie angemeldet hat oder anmelden müsste, wie von Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften.

Der wissenschaftliche und technische Reiz des metallischen Trios mit wechselnder Besetzung ergibt sich aus seinem großen Repertoire. Das fängt damit an, dass manche Heusler-Verbindungen metallische Leiter sind, andere Halbleiter. Nun ist es ja nicht so, als sei die Industrie verlegen um gute Leiter oder Halbleiter. Immerhin machen Kupfer oder Silicium seit Jahrzehnten

dächtnis für ihre Form haben: Verbiegt man sie und erwärmt sie daraufhin, nehmen sie wieder die ursprüngliche Gestalt an. Manche Heusler-Verbindungen warten auch mit eher exotischen Eigenschaften auf – auch zu diesem Punkt später mehr.

Claudia Felser hat den chemischen Baukasten der Heusler-Verbindungen für sich entdeckt, als sie in den 1990er-Jahren Supraleiter suchte – und auch unter den Heusler-Verbindungen fand. Supraleiter transportieren Strom ganz ohne elektrischen Widerstand, bislang aber leider nur bei Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt. Wie Claudia Felser bald feststellte, gilt das auch für die supraleitenden Heusler-Verbindungen, die sie seinerzeit entdeckte.

Eine Perspektive für einen verlustfreien Stromtransport und damit für einen Beitrag zum Energiesparen ergab sich so zwar nicht, für die Chemikerin tat sich aber immerhin ein Forschungsfeld auf, das sie immer noch erfolgreich beackert. „Manchmal frage ich mich auch, ob ich mich in meinem ganzen Forscherleben mit den Heuslers beschäftigen kann“, sagt sie. „Aber es gibt da einfach so unglaublich viel zu entdecken.“ Ihre Kompetenz auf diesem Gebiet hat ihr unter Materialwissenschaftlern auch schon einen Spitznamen eingetragen: Frau Heusler.

FAUSTREGELN FÜR MAGNETISCHE MATERIALIEN

Ihre Gruppe hat die Palette der Fähigkeiten, die sich den Heusler-Materialien verpassen lassen, immer wieder um neue Spezialitäten ergänzt. Mögliche technische Anwendungen hat Claudia Felser dabei immer im Blick. Dabei geht es ihr jedoch weniger um ein konkretes Material, das sie und ihre Mitarbeiter für die eine oder andere Anwendung in Position bringen wollen. „Uns geht es um neue Prinzipien und um ein tieferes Verständnis“, sagt die Forscherin.

Am liebsten ist ihr, wenn am Ende dann eine einfache Regel steht, die eine Aussage ermöglicht, ob ein Material eine bestimmte Eigenschaft besitzen wird oder nicht.

Für einige Eigenschaften von Heusler-Verbindungen funktionieren die einfachen Faustregeln prima – zum Beispiel für magnetische Materialien. „Für magnetische Heuslers interessieren wir uns seit einigen Jahren besonders“, sagt Claudia Felser. Magnetisch heißt hier vieles: ferromagnetisch oder ferrimagnetisch; weichmagnetisch und hartmagnetisch; mal mit kleinem magnetischem Moment, mal mit großem magnetischem Moment.

Allen magnetischen Materialien ist gemeinsam, dass ihre Atome ungepaarte Elektronen besitzen, die wie winzige Stabmagnete wirken. In Ferromagneten, zu denen Stab- und Hufeisenmagnete ebenso gehören wie etwa Magnete für Pinnwände, richten sich die winzigen Stabmagnete der einzelnen Atome mit ihren Nord- und Südpolen alle gleich aus. Auf diese Weise baut sich in ihnen ein magnetisches Feld auf, das sich nach außen bemerkbar macht. So lässt sich mit einem Stabmagneten ein Eisennagel nach dem anderen magnetisieren, bis am Ende eine ganze Nagelkette an dem Dauermagneten baumelt.

Ob eine Heusler-Verbindung ferromagnetisch ist, lässt sich an der Zahl bestimmter Elektronen, der Valenzelektronen, erkennen. Diese sitzen in den Atomen eher außen und bestimmen deren chemisches und physikalisches Verhalten. „Ich bin Chemikerin, ich mag gern Elektronen zählen“, sagt Felser. Bei den ferromagnetischen Heusler-Verbindungen müssen es mehr als 24 Valenzelektronen sein. Und je weiter die Zahl der Valenzelektronen über dieser Grenze liegt, desto größer ist ihr magnetisches Moment, desto stärker lässt sich das Material magnetisieren.

In der Praxis enthalten ferromagnetische Heusler-Verbindungen Mangan

oder Cobalt, bilden sich jedoch auch mit seltenen Erden. Letzteres hilft allerdings wenig, wenn man von diesen Metallen unabhängig werden will. Der Ferromagnet mit dem größten magnetischen Moment, den das Team von Claudia Felser bislang unter den Heusler-Materialien gefunden hat, heißt Cobalteisensilicid und enthält zwei Teile Cobalt, ein Teil Eisen und ein Teil Silicium.

EIN WEICHMAGNET IST PRAKTISCH FÜR TRANSFORMATOREN

Allerdings verschwindet die Magnetisierung schon bei einem relativ schwachen magnetischen Feld wieder, das umgekehrt gepolt ist wie das ursprüngliche Feld, und baut sich in entgegengesetzter Richtung auf. Ein solches Material heißt weichmagnetisch. Es ist praktisch für den Kern eines Wechselstromtransformators, weil dieser in schnellem Takt umgepolt wird. Für einen guten Permanentmagneten eignet sich das Material damit jedoch nicht. Denn der muss sich nicht nur stark magnetisieren lassen, sondern muss auch hartmagnetisch sein. Hartmagnetisch werden Stoffe genannt, die sich gerade nicht leicht entmagnetisieren oder umpolen lassen. Bei ihnen ist die Koerzitivfeldstärke groß, wie Physiker sagen.

Eine starke Magnetisierung und eine hohe Koerzitivfeldstärke vereinen die besten bekannten Permanentmagnete in sich: Legierungen von Cobalt und dem Seltenerdmetall Samarium sowie von Eisen und Neodym. Doch in Materialien ohne seltene Erden scheinen sie sich geradezu auszuschließen. „Aus der Stärke der Magnetisierung und der Koerzitivfeldstärke ergibt sich die gesamte Magnetisierungsenergie“, erklärt Gerhard Fecher, der in Felsers Abteilung eine Arbeitsgruppe leitet. „Auch wenn das bisher nicht bewiesen werden konnte, scheint ein Material nur eine begrenzte Menge magnetischer Energie aufnehmen zu können.“ Grenze hin



Erst rechnen, dann backen: Binghai Yan (links) simuliert die Eigenschaften von Materialien erst mit Modellen und gibt den Experimentatoren Hinweise, welche Elemente sie etwa im Lichtbogenofen kombinieren sollen (rechts).

oder her, die Forscher wären bereits froh, wenn sie eine Heusler-Verbindung entdecken würden, die so viel magnetische Energie aufnimmt wie die besten Permanentmagnete mit seltenen Erden.

Während sich die maximal mögliche Magnetisierung durch die Wahl einzelner Elemente beeinflussen lässt – Mangan und Cobalt tun sich da neben ein paar seltenen Erden besonders hervor –, kommt es bei der Koerzitivfeldstärke auf das Zusammenspiel aller Elemente an. Dieses bestimmt nämlich unter anderem, welche Kristallstruktur eine Verbindung bildet. Um einen Hartmagneten zu erhalten, dürfen deren kleinste Baueinheiten, die man sich durchaus auch wie Bauklötze vorstellen kann, nicht würfelförmig sein, was sie leider oft sind. Für einen Hartmagneten müssen diese sogenannten Elementarzellen stattdessen die Form eines lang gezogenen Quaders besitzen. „Dann ergibt sich für die Magnetisierung eine bevorzugte Richtung, was zu einer hohen Koerzitivfeldstärke führt“, erklärt Gerhard Fecher.

Genau die passende Struktur für einen Hartmagneten weist ein Material auf, das die Dresdner Forscher kürzlich präsentierten: Es besteht aus Mangan, Platin und Gallium und lässt sich nur sehr schwer entmagnetisieren. Das verdankt es aber nicht nur seiner Kristallstruktur, sondern auch einem anderen Charakteristikum, durch das es sich allerdings auch ein sehr kleines magneti-

ches Moment einhandelt. Bei der Substanz handelt es sich nämlich um einen Ferrimagneten. In solchen Materialien rühren die elementaren magnetischen Momente entweder von unterschiedlichen Elementen her, oder sie stammen wie im Fall der Mangan-Platin-Gallium-Verbindung von den gleichen Atomen, nämlich jenen des Mangans, die jedoch in der Kristallstruktur verschiedene Positionen einnehmen.

Die Elementarmagnete der unterschiedlich platzierten Atome orientieren ihre Pole nicht in die gleiche Richtung, also parallel. Vielmehr ordnen sie sich entgegengesetzt orientiert an, also antiparallel.

HEUSLER-VERBINDUNGEN FÜR DIE SPINTRONIK

Da es im Mangan-Platin-Gallium von den Manganatomen mit der einen magnetischen Polung mehr gibt als von jenen mit der anderen Polung, ergibt sich unter dem Strich ein kleines magnetisches Moment. Indem die Forscher das Mischungsverhältnis der drei Elemente variieren, können sie das magnetische Moment allerdings weiter reduzieren und sogar vollkommen verschwinden lassen; die Wissenschaftler sprechen dann von einem vollständig kompensierten Ferrimagneten.

Ob vollständig kompensiert oder nicht, in beiden Fällen geben sich die antiparallel ausgerichteten Elementar-

magnete gegenseitig Halt. „Ferrimagnete lassen sich daher meist nur schwer umpolen“, sagt Gerhard Fecher. „Sie sind gute Hartmagnete.“

Sein kleines magnetisches Moment wirft ein Material wie Mangan-Platin-Gallium zwar aus dem Kandidatenkreis für einen guten Permanentmagneten, prädestiniert es aber für Anwendungen in magnetischen Speichern wie Festplatten. Diese machen in Notebooks zwar allmählich anderen Speichermedien Platz, nehmen aber in der über die ganze Welt verteilten Computercloud immer noch riesige Datenmengen auf.

„Eine starke Magnetisierung stört in magnetischen Speichern nur, weil sie ein großes Streufeld erzeugt, das es erschwert, benachbarte Speicherpunkte auszulesen“, erklärt Claudia Felser. „Die einzelnen Speicherpunkte lassen sich bei einer kleinen Magnetisierung daher viel dichter packen.“ Bis Ferrimagnete wie Mangan-Platin-Gallium in Speichermedien ankommen, wird es aber vermutlich noch eine Weile dauern, und auf dem Weg dorthin müsste sicher noch eine Alternative für das teure Platin her.

Magnetische Heusler-Verbindungen sind aber nicht nur interessant, um Information zu speichern, sondern auch, um sie zu verarbeiten. Das geschieht in der Spintronik – einem zukunftsreichen Zweig der Elektronik, der bereits die modernen Leseköpfe für Festplatten hervorgebracht hat.

Spintronische Bauteile nutzen nicht nur die Ladung von Elektronen aus, sondern auch deren Spin. Es handelt sich dabei um eine quantenmechanische Eigenschaft, die man sich hilfswiese als Drehsinn eines Elektrons vorstellen kann. Er macht die Elektronen zu den winzigen Stabmagneten, die im Permanentmagneten in kollektiver Anstrengung das magnetische Feld erzeugen, das auf Eisen und Co eine unwiderstehliche Anziehung ausübt. In der Elektronik schafft der Spin eine weitere Möglichkeit, Information zu speichern: Je nachdem, in welche Richtung der mikroskopische Stabmagnet zeigt, speichert er eine Null oder eine Eins.

Die erste vielversprechende Heusler-Verbindung, die Claudia Felser für die Spintronik ins Spiel brachte, besteht aus vier Elementen, nämlich Cobalt, Chrom, Eisen und Aluminium, kurz CCFA. Das Material, das die Chemikerin bereits entdeckte, als sie noch an der Universität Mainz forschte, ist ebenfalls magnetisch und besitzt vor allem einen kolossalen Magnetowiderstand.

Bereits Ende der 1980er-Jahre entdeckten Peter Grünberg und Albert Fert den Riesenmagnetowiderstand: Dieser baut sich in Sandwiches aus zwei dünnen magnetischen Schichten und einer nichtmagnetischen Zwischenlage auf, wenn die Magnetschichten in entgegengesetzter Richtung polarisiert sind. Da jede einzelne Magnetschicht fast nur Elektronen der Spinrichtung passieren lässt, die zu ihrer Polarisierung passt, bleiben auf dem Weg durch eine entgegengesetzt gepolte Doppelschicht die meisten auf der Strecke.

Für die Entdeckung des Riesenmagnetowiderstands erhielten Grünberg und Fert 2007 den Physik-Nobelpreis. CCFA besitzt bei Raumtemperatur sogar einen vielfach höheren Magnetowiderstand als das Material, an dem Grünberg und Fert den Effekt erstmals nachwies. So eignet es sich hervorragend, um Daten magnetischer Speicher-

punkte zu lesen. Das dazugehörige Patent kaufte IBM 2001.

Künftig wollen die Dresdner Forscher Materialien vermehrt in der Form erforschen, in der die Elektronikindustrie sie verarbeitet: in dünnen Schichten. Zu diesem Zweck haben sie in einem Seitentrakt ihres Institutsgebäudes bereits den größten Teil einer neuen Anlage aufgebaut, die in kaum einem Wohnzimmer Platz finden dürfte. Sie sieht in etwa aus wie die Internationale Raumstation ISS ohne Solarmodule, dafür aber mit Besuch von einer fliegenden Untertasse, und wird wie die ISS auch immer wieder um neue Komponenten erweitert.

EINE ANLAGE FÜR VIELE EXPERIMENTELLE SCHRITTE

Die Maschine steht auf einem Boden, in den mit bunten Farbtafeln ebenfalls das Periodensystem der Elemente eingelassen ist – das Universum, in dem die Forschung von Claudia Felser und ihren Mitarbeitern stattfindet. Die Anlage ist das Prunkstück im Gerätepark

von Felters Abteilung. Denn hier können die Forscher viele experimentelle Schritte in einem geschlossenen System bewältigen, die sonst in separaten Apparaten stattfinden.

In den Vakuumkammern des Gerätes erzeugen sie auf unterschiedliche Weisen ihre Proben aus zahllosen Elementkombinationen in nahezu beliebigen Stärken. So können sie hier die Metalle auch in einzelnen Atomlagen übereinanderschichten und auf diese Weise Heusler-Verbindungen erzeugen, die sich auf gängigen Synthesewegen nicht bilden. Und indem sie die Proben durch ein langes, luftleeres Rohr zu verschiedenen Stationen manövrieren, können sie die neuen Materialien auch gleich mit verschiedenen Kraftmikroskopen und einem Rastertunnelmikroskop inspizieren oder mithilfe der Photoelektronenspektroskopie die genaue Zusammensetzung und die elektronische Struktur des Materials bestimmen.

Die elektronische Struktur, die sich aus der Zusammensetzung und der Struktur eines Materials ergibt, ist für Festkörperforscher so wichtig wie der

X₂YZ Heusler-Komponenten

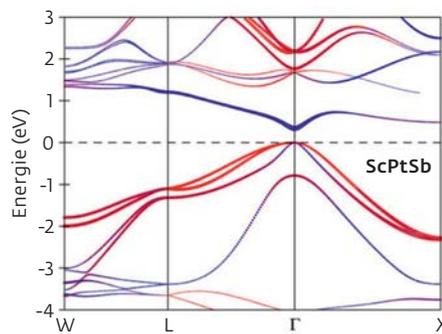
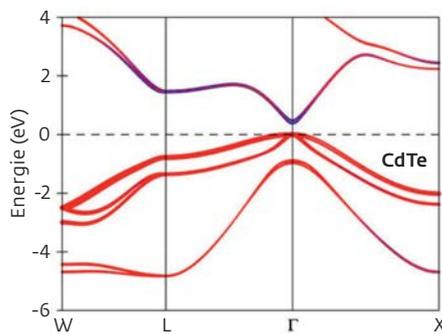
H 2.20																	He	
Li 0.98	Be 1.57											B 2.04	C 2.55	N 3.04	O 3.44	F 3.98	Ne	
Na 0.93	Mg 1.31											Al 1.61	Si 1.90	P 2.19	S 2.58	Cl 3.16	Ar	
K 0.82	Ca 1.00	Sc 1.36	Ti 1.54	V 1.63	Cr 1.66	Mn 1.55	Fe 1.83	Co 1.88	Ni 1.91	Cu 1.90	Zn 1.65	Ga 1.81	Ge 2.01	As 2.18	Se 2.55	Br 2.96	Kr 3.00	
Rb 0.82	Sr 0.95	Y 1.22	Zr 1.33	Nb 1.60	Mo 2.16	Tc 1.90	Ru 2.20	Rh 2.28	Pd 2.20	Ag 1.93	Cd 1.69	In 1.78	Sn 1.96	Sb 2.05	Te 2.10	I 2.66	Xe 2.60	
Cs 0.79	Ba 0.89			Hf 1.30	Ta 1.50	W 1.70	Re 1.90	Os 2.20	Ir 2.20	Pt 2.20	Au 2.40	Hg 1.90	Tl 1.80	Pb 1.80	Bi 1.90	Po 2.00	At 2.20	Rn
Fr 0.70	Ra 0.90																	
		La 1.10	Ce 1.12	Pr 1.13	Nd 1.14	Pm 1.13	Sm 1.17	Eu 1.20	Gd 1.20	Tb 1.10	Dy 1.22	Ho 1.23	Er 1.24	Tm 1.25	Yb 1.10	Lu 1.27		
		Ac 1.10	Th 1.30	Pa 1.50	U 1.70	Np 1.30	Pu 1.28	Am 1.13	Cm 1.28	Bk 1.30	Cf 1.30	Es 1.30	Fm 1.30	Md 1.30	No 1.30	Lr 1.30		

Immense Vielfalt: Die im Periodensystem der Elemente farbig markierten Metalle lassen sich zu unzähligen Verbindungen X₂YZ kombinieren. Die Farben stehen für die unterschiedlichen Positionen der Elemente in der Kristallstruktur, die für Heusler-Materialien typisch ist. Bei den Zahlen handelt es sich um die Elektronegativitäten.



Oben Gerhard Fecher, Thomas Krüger und Roshnee Sahoo (von links) erzeugen in der kugelförmigen Sputterkammer zunächst unterschiedliche Materialien, die sie anschließend mit verschiedenen Analysemethoden untersuchen können, indem sie die Proben durch die Röhren der Anlage verschieben.

Unten Aus der Bandstruktur eines Materials lassen sich dessen elektronische Eigenschaften ableiten. Die Bandstrukturen von Cadmiumtellurid (CdTe) und der Heusler-Verbindung Scandiumplatinantimonid (ScPtSb) ähneln sich um die Nulllinie der Energie, weil beide Substanzen topologische Isolatoren sind, also nur an ihrer Oberfläche Strom leiten.



genetische Code für Biologen. Denn das Verhalten der Elektronen bestimmt die Merkmale eines Materials genauso, wie das Erbgut einen guten Teil unserer Eigenschaften festlegt. Zu wissen und möglichst sogar vorherzusagen, wo und wie sich Elektronen durch ein Material bewegen, gibt Aufschluss darüber, welche Art von Magnetismus ein Stoff zeigt und was er sonst noch so draufhat. Besonders wichtig sind die Wege der Elektronen natürlich in der Elektronik.

Die Dresdner Forscher untersuchen die elektronische Struktur eines Materials möglichst genau, nachdem sie es hergestellt haben. Vorher berechnen sie

jedoch bereits mit aufwendigen Computerprogrammen, welches Verhalten sie von den Elektronen und damit der Heusler-Verbindung an sich zu erwarten haben – vor allem wenn einfaches Elektronenzählen nicht mehr weiterhilft. So kreisen sie die eine Substanz mit der gewünschten Eigenschaft zumindest ein und sparen sich den Aufwand, für Tests unzählige Materialkombinationen zu synthetisieren. Da die Rechnungen aber immer nur auf – wenn auch inzwischen ziemlich guten – Annäherungen beruhen und nicht immer ganz richtigliegen, geht es ohne anschließende Experimente auch wieder nicht.

In dem Dreisprung Rechnen, Synthetisieren, Messen sucht Felsers Team etwa nach neuen halbmetallischen Heusler-Verbindungen, die ebenfalls in der Spintronik Anwendung finden können. Halbmetallische magnetische Materialien leiten nur Ladungsträger einer Spinrichtung. Diesem Umstand verdankt etwa CCFA seinen kolossalen Magnetowiderstand. Zu den wenigen halbmetallischen Heusler-Verbindungen gehört zudem Cobalteisensilicid, das sich wegen seines großen magnetischen Moments auch als Ferromagnet in Szene gesetzt hat.

Die Forscher um Claudia Felser suchen aber auch nach Heusler-Verbindungen, die nicht magnetisch sind und deren Leitfähigkeit trotzdem von der Spinrichtung abhängt. Hier trifft das Spezialgebiet der Dresdner Forscher auf ein Forschungsfeld, das Physiker erst vor gut zehn Jahren erschlossen haben: topologische Isolatoren, die in der Physik inzwischen ziemlich angesagt sind.

Im Inneren der Kristalle eines solchen Materials können sich Elektronen so wenig bewegen wie in isolierendem Kunststoff. Über deren Oberfläche flit-

zen sie aber so ungehindert wie durch ein Metall. Dabei bewegen sich die Elektronen der beiden Spinorientierungen immer in unterschiedliche Richtungen. Das macht sie für Rechenoperationen der Spintronik interessant. „Topologische Isolatoren würden in spintronischen Bauteilen viel weniger Energie benötigen als andere Materialien“, sagt Binghai Yan: Claudia Felsers Mann für topologische Isolatoren, der am Dresdner Max-Planck-Institut eine Forschungsgruppe genau zu diesem Thema leitet.

TOPOLOGISCHE ISOLATOREN UNTER HEUSLER-VERBINDUNGEN

Ans Dresdner Institut kam der Physiker, nachdem seine jetzige Chefin 2009 seinen ehemaligen Chef, Shoucheng Zhang von der Stanford University, kennengelernt hatte – auf einer Konferenz zur Spintronik. Während Felsler die Perspektiven der Heusler-Verbindungen für diese Technik präsentierte, sprach Zhang über topologische Isolatoren. Schnell waren sich beide anschließend einig, dass es topologische Isolatoren auch unter den Heusler-Verbindungen geben müsse und dass diese gegenüber anderen Stoffen dieser Art praktische Vorteile haben könnten. „Die ursprünglichen topologischen Isolatoren konnte nur eine Forschergruppe synthetisieren, sonst hat das keiner geschafft“, sagt Binghai Yan. „Heusler-Verbindungen herzustellen ist dagegen viel einfacher.“

Binghai Yans Spezialität ist aber nicht die Synthese topologischer Heusler-Verbindungen, sondern die theoretische Vorhersage, welcher Stoff dafür am ehesten infrage kommt. „Um solche Materialien zu finden, brauchen wir eine Art Schatzkarte“, sagt er. „Die Theorie liefert gute Karten.“ So haben die Dresdner Forscher inzwischen an die 100 Heusler-Verbindungen gefunden, die zu den topologischen Isolatoren gehören. Diese enthalten jedoch immer

Metalle der seltenen Erden und meist Platin oder Gold dazu. Dass dies der praktischen Anwendung nicht im Weg stehen muss, wenn ein Material seinen Job nur gut genug macht, beweist die Hochtechnologie von heute, in der seltene Erden und Edelmetalle trotz aller Nachteile an zahlreichen Stellen unverzichtbar sind.

Ob mit oder ohne seltene Erden, das Fernziel, das sich Claudia Felsler gesteckt hat, scheint angesichts der fast unbegrenzten Möglichkeiten der Heusler-Materialien und der Vielseitigkeit, die sie bereits bewiesen haben, nicht zu hoch gegriffen: „Ich möchte mindestens noch ein Material, das wir hier entwickeln, in die Anwendung bringen.“ ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- In Heusler-Verbindungen werden 52 Metalle in unterschiedlicher Weise miteinander kombiniert. So lassen sich Materialien mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften erzeugen: Halbleiter, metallische Leiter, Halbmetalle, die zudem verschiedene Formen des Magnetismus, aber auch exotischere Charakteristika wie etwa Supraleitfähigkeit, Thermoelektrizität, einen kolossalen Magnetowiderstand oder topologische Eigenschaften zeigen können.
- Heusler-Materialien erweitern somit den Spielraum etwa für die Elektronikindustrie, könnten manche Branchen aber auch unabhängig machen von Stoffen wie den Metallen der seltenen Erden, die nur begrenzt verfügbar oder ökologisch umstritten sind.
- Forscher des Max-Planck-Instituts für Chemische Physik fester Stoffe haben unter anderem bereits einen weichmagnetischen Ferrimagneten, der mit seinem hohen magnetischen Moment eine Voraussetzung für einen guten Permanentmagneten erfüllt, und einen hartmagnetischen Ferrimagneten mit kleinem magnetischem Moment für mögliche Anwendungen in der Speichertechnik entwickelt. Die Forscher haben aber auch Halbmetalle mit kolossalem Magnetowiderstand und topologische Isolatoren für die Spintronik gefunden.

GLOSSAR

Ferrimagnet: In ihm orientieren sich die atomaren Elementarmagnete, die man sich als winzige Stabmagnete vorstellen kann, entgegengesetzt, also antiparallel, und nicht parallel wie in Ferromagneten (zum Beispiel Eisen). Da in Ferrimagneten aber die Elementarmagnete mit einer der beiden entgegengesetzten Ausrichtungen überwiegen, üben sie nach außen noch ein kleines magnetisches Feld aus.

Heusler-Verbindungen: Materialien aus üblicherweise drei Metallen. Da insgesamt 52 Metalle in unterschiedlichen Zusammenstellungen zu Heusler-Verbindungen kombiniert werden können, ergeben sich sehr viele Variationsmöglichkeiten. Bislang sind etwa 1500 Heusler-Verbindungen bekannt.

Koerzitivfeldstärke: Die Stärke des magnetischen Feldes, das benötigt wird, um einen magnetisierten Stoff vollständig zu entmagnetisieren.

Spintronik: Eine Form der Elektronik, die nicht nur die Ladung der Elektronen, sondern auch deren Spin nutzt, der Elektronen zu winzigen Stabmagneten macht. Sie ermöglicht es unter anderem, Daten in heutigen Festplatten dichter zu packen.

Topologischer Isolator: Ein Material, dessen Kristalle in ihrem Inneren elektrisch isolierend wirken, auf ihrer Oberfläche jedoch Strom leiten. Da die Richtung des Stroms vom Spin der Elektronen abhängt, sind solche Substanzen für die Spintronik interessant.

Eine dunkle Welt aus Eis

Erstmals erreichte eine Raumsonde die Ceres. Mit den beiden Kameras an Bord erkunden die Wissenschaftler aus dem **Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung** in Göttingen die dunkle Oberfläche des Zwergplaneten. Wassereis haben sie schon entdeckt. Aber ruht tief unter den Kratern auch noch ein Ozean?

TEXT **THORSTEN DAMBECK**

Auch unter Asteroiden gilt: Einiges ist relativ. Nehmen wir etwa Ceres, welche die Internationale Astronomische Union seit dem Jahr 2006 in der Kategorie Zwergplanet führt. Der „Zwerg“, der nach der römischen Göttin für Landwirtschaft und Fruchtbarkeit benannt wurde, ist gleichzeitig der größte unter den zahllosen kleinen Körpern, die zwischen Mars und Jupiter um die Sonne kreisen.

Geometrisch beschreibt man Ceres' Gestalt als Ellipsoid. Auf den ersten Blick ähnelt sie jedoch einer Kugel mit einem mittleren Durchmesser von 946 Kilometern. Natürlich ist ihr planetarer Körper nicht perfekt, der Ellipsoidform ist ein Gelände aufgeprägt, das sich bis 7,5 Kilometer tief absenkt und andernorts um bis zu vier Kilometer aufragt. Mit 3,2 Prozent zeigt diese Variation eine deutlich größere Spanne als beim Erdmond (ein Prozent). Verglichen mit ihrer Schwester im Asteroidengürtel, Vesta, deren Wert bei 15 Prozent liegt, variiert Ceres' Topografie jedoch nur moderat – relativ betrachtet.

Ceres und Vesta, beide Miniplaneten hat die NASA-Sonde *Dawn* angesteuert, nachdem sie im Jahr 2007 ihre Reise antrat. *Dawn* erreichte im Sommer 2011 zunächst Vesta. Rund 14 Monate lang erforschte der irdische Späher aus

der Umlaufbahn diese Welt. Dann zündete die Sonde erneut ihr elektrisches Ionentriebwerk und brach zu Ceres auf, wo sie schließlich im März 2015 eintraf. Auch Ceres wird seitdem auf unterschiedlich engen Bahnen umkreist.

KOMPLEXE GEOLOGIE FASZINIERT DIE FORSCHER

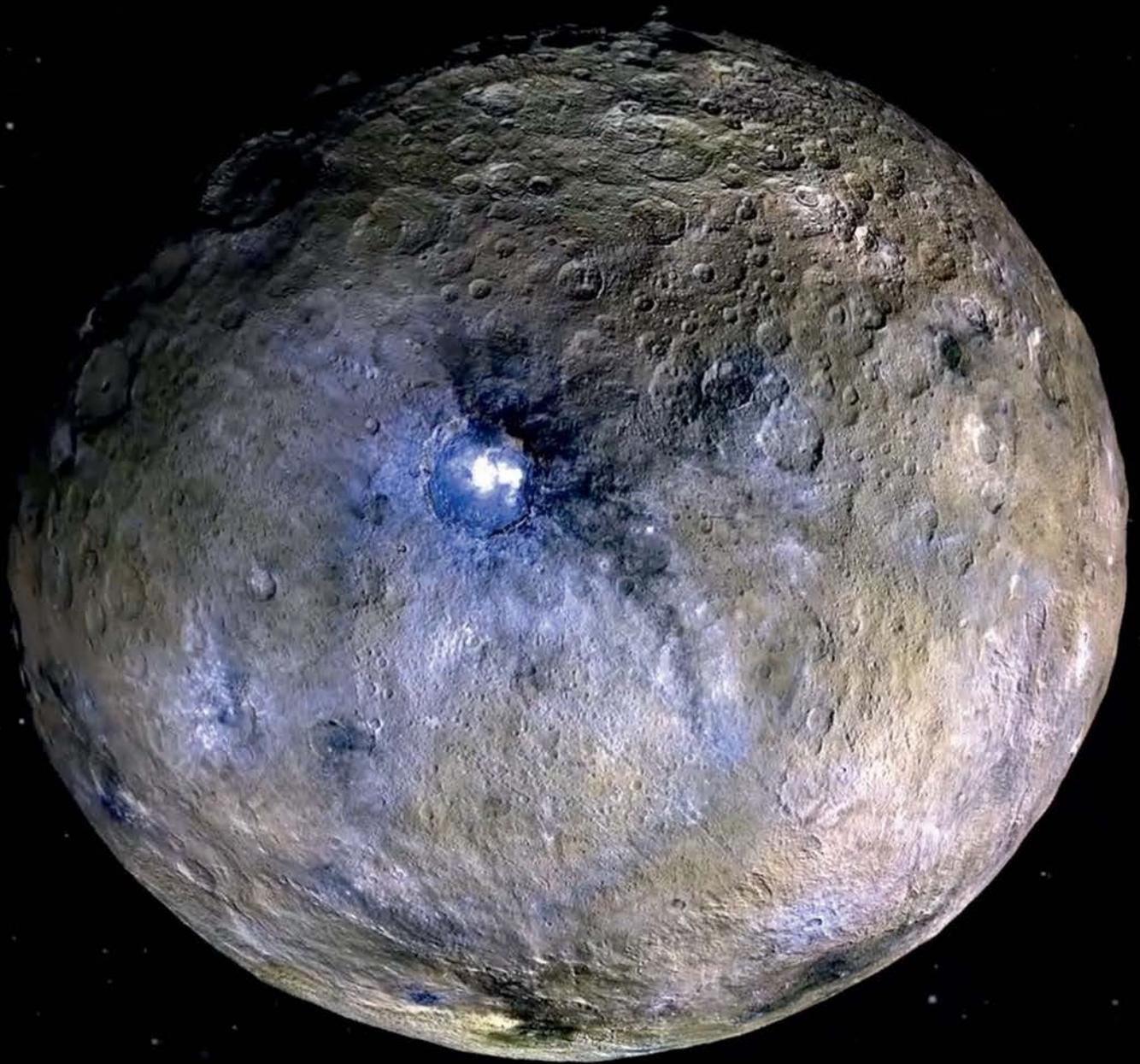
Unter den Bordexperimenten von *Dawn* sticht das wissenschaftliche Kamerasystem hervor. Es stammt vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen. Die zwei sogenannten *framing cameras* sind gleichsam *Dawns* Augen, für die Erkundung der beiden Himmelskörper spielen sie eine zentrale Rolle (siehe Kasten auf Seite 56). Nun ist ihr Blick auf Ceres gerichtet. Deren Oberfläche ist überwiegend so dunkel wie frischer Asphalt, nur neun Prozent des einfallenden Lichtes werden durchschnittlich reflektiert. Gleichwohl sind die Forscher fasziniert: Der Planetenzwerg ist eine Welt mit einer komplexen Geologie. Zwar ist vieles, was die Bilderflut nun offenbart, noch nicht ausgewertet, doch bereits die ersten Analysen haben Unerwartetes ans Tageslicht gebracht.

Dawn ist der erste Besucher bei Ceres, bis zum vergangenen Jahr hatte es keine Raumsonde je dorthin geschafft.

Obwohl bereits vor mehr als zwei Jahrhunderten vom italienischen Astronomen Giuseppe Piazzi entdeckt, war Ceres noch kaum erforscht. Ihre Entdeckungsgeschichte ist ein kosmischer Krimi: Schon im ausgehenden 18. Jahrhundert war unter Wissenschaftlern die Skepsis verbreitet, ob die auffällige Lücke zwischen Mars und Jupiter wirklich leer sei. Könnte dort ein unentdeckter Planet sein Unwesen treiben?

Eine Gruppe deutscher Astronomen – die „Himmelspolizey“ – fahndete systematisch im Tierkreis nach dem vermuteten Himmelskörper. Und tatsächlich: In der Neujahrsnacht 1801 wurde ein bis dato unbekanntes Objekt dingfest gemacht: Ceres. Jedoch gelang dies keinem Himmelspolizisten, vielmehr geschah der Fund an der Sternwarte von Palermo. Der neue „Wandelstern“ hatte fast genau jene Distanz zur Sonne, welche die Titius-Bode-Reihe für den gesuchten Planeten vorhergesagt hatte. Diese nach den beiden Gelehrten Johann Titius und Johann Bode benannte empirische Formel hatte schon den Sonnenabstand des zwei Jahrzehnte zuvor entdeckten Uranus korrekt reproduziert. Ebenso wie Uranus wurde Ceres nun als Planet betrachtet.

Doch Ceres' Entdeckung war nur der Anfang, offenbar gab es eine ganze Bande unentdeckter Planeten hinter



Zwerg im All: Diese Falschfarbaufnahme zeigt unterschiedliches Material auf der Oberfläche von Ceres. Deutlich erscheinen die hellen Regionen im Occator-Krater, halbwegs in der Bildmitte.

dem Mars: Bald schon gingen Pallas und Juno ins Netz, 1807 folgte Vesta. 1850 waren es schon so viele, dass sich die Bezeichnung Kleinplaneten durchsetzte. Und bis zur Wende zum 20. Jahrhundert waren 462 von Ceres' Artgenossen aufgespürt, ihr Status als Planet war da schon lange passé. Heute bevölkern fast eine halbe Million bekannter Exemplare den Asteroidenhauptgürtel zwischen Mars und Jupiter. Die allermeisten sind relativ klein, allein auf Ceres entfällt rund ein Drittel der Gesamtmasse des Gürtels.

KAMERA MIT ADLERBLICK STUDIERT EINSCHLAGKRATER

Zurück zur Gegenwart: Mittlerweile haben Forscher des internationalen *Dawn*-Teams erste geologische Karten von Ceres präsentiert. Diese basieren allerdings auf Beobachtungen mit den *framing cameras*, die aus relativ großem Abstand (4424 Kilometer) ausgeführt wurden. Seit Januar sieht *Dawn* jedoch

mit dem Blick eines Adlers auf die mit Kratern bedeckte Oberfläche. Auf ihrem neuen Orbit nähert sich die Sonde bis auf 385 Kilometer.

„Viele der Oberflächendetails, die wir seit der Ankunft von *Dawn* bei Ceres kennen, können wir jetzt mit wesentlich höherer Auflösung untersuchen“, sagt Max-Planck-Forscher Andreas Nathues, der von Göttingen aus das Kameraexperiment leitet. Insbesondere studieren die Planetenforscher die verschiedenen Erscheinungsformen der Einschlagkrater auf Ceres.

Ein kürzlich aufgenommenes Bild zeigt den rund 25 Kilometer großen Einschlagkrater Kupalo; er ist nach einer slawischen Fruchtbarkeitsgöttin benannt und liegt auf der südlichen Hemisphäre. An seinem inneren Kratertrand befinden sich auffällig helle Streifen, die in radialer Richtung verlaufen. Vermutlich sind sie durch Hangrutschungen entstanden. Kupalo hat keinen Zentralberg, wie sonst bei Einschlagkratern dieser Größe üblich.

Stattdessen befindet sich in seiner Mitte eine Bergkette, die sich über eine Länge von mehr als sieben Kilometern erstreckt. Mehrere ähnliche Bergketten wiederholen sich nah am Kratertrand, der außerdem auffällig von der Kreisform abweicht. Kupalos Kraterboden ist ansonsten weitgehend flach und ohne später entstandene kleinere Krater – ein Hinweis auf ein vergleichsweise geringes Alter. Im Innern gibt es mehrere helle Flecken, doch dazu später mehr.

Auch der Krater Messor (Durchmesser: 42 Kilometer) fällt wegen seiner sehr ungewöhnlichen Gestalt auf. Sein Rand ist, wie der von Kupalo, unregelmäßig geformt, und auch ihm fehlt ein Zentralberg. Außerdem zeigt der Kraterboden deutlich wellenförmige Muster. Messor ist einem älteren Krater überlagert, dessen Relikte noch erkennbar sind. Offenbar ist Messor ein älteres Exemplar, denn die Häufigkeit kleinerer Einschlagkrater in seinem Innern ist nur unwesentlich geringer als außerhalb des Kraters.



DIE AUGEN DES SPÄHERS

Die Augen der NASA-Sonde sind made in Germany: die beiden *framing cameras*. Neben der Kartierung der Oberfläche dienen sie der Navigation der Sonde. Jede Kamera wiegt 5,5 Kilogramm. Sie können Weißlicht- und Farbbilder aufnehmen und verfügen dafür über sieben Filter im Spektralbereich vom sichtbaren Licht bis zum nahen Infrarot. Das Kamerasystem ist ein Gemeinschaftsprojekt: Es wurde vom Göttinger Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung gemeinsam mit dem DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin und dem Institut für Datentechnik und Kommunikationsnetze der TU Braunschweig entwickelt und gebaut.

Zusätzlich zu den hochauflösenden Fotos sind damit Ansichten der Oberfläche mit 3D-Effekt möglich, die sich auch zu virtuellen Überflügen montieren lassen. Drei weitere Bordexperimente komplettieren die wissenschaftliche Nutzlast: das Infrarotspektrometer aus Italien, mit dem die Forscher die Mineralzusammensetzung sowie die Temperaturverteilung auf der Oberfläche von Ceres analysieren; das Gamma- und Neutronenspektrometer aus den USA, das für die Bestimmung chemischer Elemente im Oberflächengestein zuständig ist; hinzu kommt ein Radiowellenexperiment, das vor allem zur Vermessung des Schwerefelds des Himmelskörpers und der Positionsbestimmung dient.

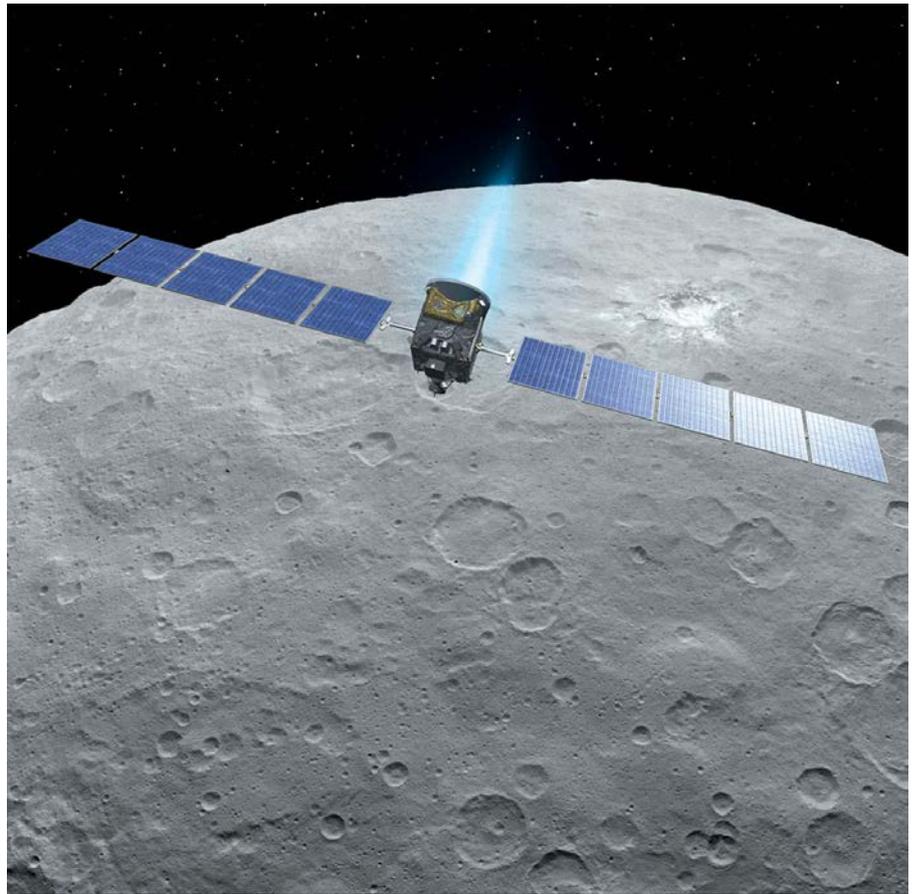
Ein weiterer, rund 30 Kilometer großer und bisher noch namenloser Krater besitzt einen ausgeprägten Zentralberg sowie auffällige Terrassen, die sich über den gesamten Kraterboden erstrecken. Auch diese Strukturen deuten darauf hin, dass hier ein Asteroid in Material eingeschlagen ist, das direkt danach eine hohe Mobilität hatte. Ein Hinweis auf Wassereis im Boden?

ÄUSSERE SCHICHTEN BESTEHEN NICHT AUS HARTEM GESTEIN

Ein anderer Krater, der 125 Kilometer große Dantu, erscheint auf den Bildern auffällig flach und besitzt ein Netzwerk aus Brüchen, wie sie in ähnlicher Form auch bei Mondkratern bekannt sind, etwa bei dem jungen Krater Tycho. „Bei ihrer Entstehung ist wahrscheinlich entscheidend, dass die äußeren Schichten von Ceres nicht aus hartem Gestein bestehen. Beim Einschlag des Asteroiden wurde wahrscheinlich Wassereis unter der Oberfläche zumindest teilweise geschmolzen. Kühlt es sich anschließend ab, kann es sich stark zusammenziehen und viele Risse bilden“, sagt Max-Planck-Wissenschaftler Martin Hoffmann.

Anders als auf unserem Mond hat Wassereis bei der Ausbildung der Strukturen eine wichtige Rolle gespielt. Dass Ceres auch Eis enthält, war bereits vor der *Dawn*-Mission erwartet worden. „Anders als mit einem hohen Wassereisanteil ist die geringe mittlere Dichte von 2,16 Gramm pro Kubikzentimeter nicht zu erklären“, erläutert Andreas Nathues. Auch der Vergleich mit dem stark eishaltigen Saturnmond Rhea deutet auf Wassereis in Ceres' Oberflächenmaterial hin.

„Die unregelmäßige Gestalt von Ceres' Kratern erinnert an Rhea“, erklärt Carol Raymond vom *Dawn*-Team. Denn die Ceres-Krater seien anders als jene auf Vesta, dem vorherigen Studienobjekt der Sonde. „Die Ceres-Krater unterscheiden sich stark von den wie Schüsseln geformten Exemplaren Vestas“, so die Forscherin vom kalifornischen Jet Propulsion Laboratory.



Naherkundung: Die im Jahr 2007 gestartete Raumsonde *Dawn* flog im Sommer 2011 am Asteroiden Vesta vorbei und schwenkte am 6. März 2015 in eine Umlaufbahn um Ceres ein. Seit Januar nähert sich das Raumfahrzeug dem Zwergplaneten bis auf 385 Kilometer.

Mit dem Saturnmond Rhea teilt Ceres auch die fast identische Oberflächenschwerkraft – sie differiert zwischen beiden Himmelskörpern nur um vier Prozent. Noch sind es indirekte Hinweise, etwa die Morphologie der Einschlagkrater, die vom Eis auf Ceres erzählen. Direkte Messungen, etwa mit dem Infrarotspektrometer an Bord, stehen noch aus. Trotzdem sind Hoffmann und Nathues überzeugt, dass Wassereis in der Geologie eine entscheidende Rolle spielte: Durch die Hitze des Einschlags geschmolzen, entstanden beim anschließenden Erstarren viele Strukturen, die sich bei Impakten in festem Gestein wesentlich schwächer ausprägen oder sogar ganz fehlen. „Auch wenn diese Prozesse im Detail noch nicht verstanden sind, könnten sie die Bruchlinien, die Terrassen, das Fehlen einfacher Zentralberge und die unregelmäßigen Kraterränder erklären“, meint Andreas Nathues.

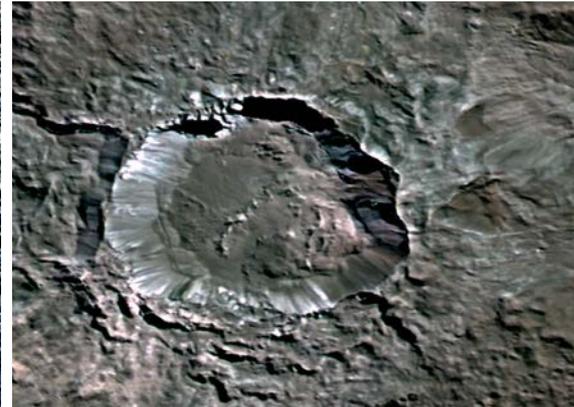
Zurück zu den ungewöhnlich hellen Ablagerungen, die etwa bei Dantu gefunden wurden. Ähnliches hatten

die Max-Planck-Forscher schon früher an anderen Oberflächenstellen entdeckt, bereits im Anflug waren die Kameras von hellen Flecken auf der Oberfläche geblendet worden. Auf den Fotos traten sie zunächst als überbelichtete Stellen hervor. Laut Martin Hoffmann eine völlig überraschende Beobachtung. Im vergangenen Dezember berichtete nun ein Team, angeführt von Nathues und Hoffmann, im Wissenschaftsmagazin *NATURE*, dass die auffälligen Flecken keineswegs selten sind, 130 konnten auf Ceres bereits identifiziert werden.

IM WASSER GELÖSTES SALZ BLEIBT ZURÜCK

Mit Messungen in Labors in Kanada und den USA haben die Forscher versucht, das mit den *framing cameras* aufgenommene Farbsignal dieser Flecken nachzustellen. Das Ergebnis: Das helle Oberflächenmaterial ist Salz. Vermutlich besteht es aus wasserhaltigem Magnesiumsulfat oder aus ande-

Panoptikum für Planetologen: Das Studium von Kratern vermittelt tiefe Einblicke in die Geologie von Ceres. Jedes dieser Überbleibsel von Asteroideneinschlägen erzählt eine eigene Geschichte, ob Dantu, Kupalo, Messor, Occator oder Oxo (von links). Vor allem die hellen Ablagerungen überall auf der Oberfläche haben die Forscher erstaunt. Dabei handelt es sich offenbar um Material, das aus wasserhaltigem Magnesiumsulfat oder aus anderen Salzen besteht. Im Krater Occator – hier abgebildet in einer farbcodierten topografischen Ansicht – kann sich zudem nach Sonnenaufgang am Kraterboden Dunst bilden.



ren hellen Salzen, wie sie auch in irdischen Salzseen vorkommen, etwa in Torrevieja und La Mata an der spanischen Costa Blanca. Nathues geht deshalb davon aus, dass es unter der Oberfläche von Ceres nicht nur Eis gibt, sondern dass dieses teilweise mit Salz vermischt ist.

Sobald diese Mixtur durch Asteroideneinschläge freigelegt oder durch innere Kräfte zur Oberfläche befördert wird, kann sie allmählich sublimieren, also übergangslos vom festen in den gasförmigen Zustand übergehen. Das ursprünglich im Wasser gelöste Salz

bleibt zurück. „Die Untersuchung dieser hellen Ablagerungen auf der Oberfläche von Ceres wird eines der Hauptziele für die *Dawn*-Mission in den nächsten Monaten sein“, sagt Martin Hoffmann voraus.

DUNST HÄNGT VOM STAND DER SONNE AB

Doch manche der hellen Gebiete haben noch mehr zu bieten, beispielsweise der relativ junge Krater Occator auf der Nordhemisphäre mit einem Alter von rund 80 Millionen Jahren und einem

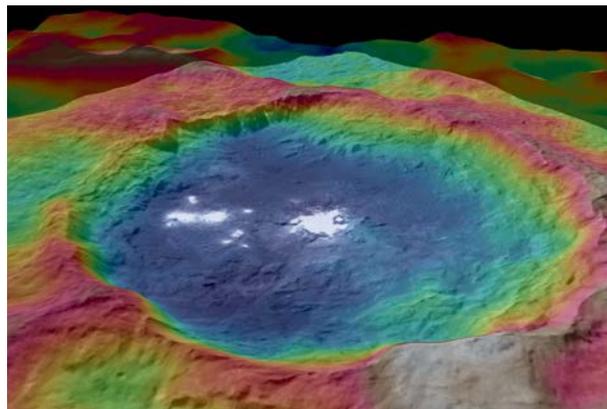
Durchmesser von mehr als 90 Kilometern. Im Innern seiner bis zu vier Kilometer tiefen Kraterwälle haben die *framing cameras* sogar die hellsten Stellen der gesamten Oberfläche ausgemacht. Und: Die Fotos zeigen, dass sich nach Sonnenaufgang am Kraterboden Dunst bilden kann. Sichtbar wird dieser Dunst allerdings nur, wenn Occator unter einem sehr flachen Winkel fotografiert wird. Im Tagesrhythmus lichten sich die Schwaden immer dann, wenn die Sonne nahe am oder schon unter dem Horizont steht.

Auch dieser Befund stützt die Hypothese vom Wassereis unter der Oberfläche. Die genaue Entstehung des Dunstes sei aber noch unklar. Vermutlich geschieht dies durch Öffnungen im Boden, wenn Wassereis ins Weltraumvakuum sublimiert, so Andreas Nathues. Weil dabei auch Staubpartikel mitgerissen werden, ähnele der Prozess den Ausgasungen bei Kometen.

Auch die zweithellste Struktur auf der Ceres-Oberfläche, der acht Kilometer große Oxo-Krater, ist vergleichsweise jung. Auch dort zeigen die Fotos helle Flecken und Dunst. Sollten sich die Anzeichen für Bodeneis erhärten, so wären mit den *framing cameras* erst-

Orientierung auf einer fernen Welt: Andreas Nathues (links) und Martin Hoffmann inspizieren ein globales Mosaik des Kleinplaneten Vesta. Ihn hatte die Sonde *Dawn* als erstes Ziel ihrer Tour angesteuert. Die beiden *framing cameras* an Bord wurden unter anderem am Göttinger Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung entwickelt und gebaut.





mals im Asteroidengürtel Eisvorkommen aus der Nähe nachgewiesen worden. Offensichtlich kann Eis in dieser eigentlich zu warmen Region des Sonnensystems über lange Zeiträume stabil sein, wenn es von einer Gesteinsschicht an der Oberfläche vor dem Verdampfen geschützt ist.

Die Beobachtungen *Dawns* untermauern Messungen des europäischen Weltraumteleskops *Herschel*, das im Infrarotlicht des Zwergplaneten bereits die spektrale Signatur von Wasserdampf entdeckt hatte. Eine der beiden möglichen von *Herschel* gefundenen Dampfquellen fällt nämlich mit der Position des Occator-Kraters zusammen. Dort sind den Analysen des Nathues-Teams zufolge sogenannte hydrierte Magnesiumsulfate ein wesentlicher Bestandteil des hellen Bodenmaterials, also wasserstoffhaltige Mineralsalze. Viele der anderen hellen Gebiete auf Ceres bestehen dagegen wahrscheinlich aus ausgetrockneten Salzen. Die Aktivität, die am Occator-Krater noch andauert, ist dort offenbar schon länger versiegt.

Eine weitere aktuelle Studie widmet sich ebenfalls Ceres' Oberflächenmineralien. Mit dem Infrarotspektrometer *Dawns* maßen die Forscher die spektrale Verteilung des reflektierten Lichts bei Wellenlängen zwischen 0,4 und 5 Mikrometern. Cristina De Sanctis vom römischen Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali (IAPS) liest aus den Messungen, dass ammoniumhaltige Schichtsilikate auf Ceres weitverbreitet sind. Diese Substanzen seien womög-

lich durch Reaktionen mit organischem Material oder Ammoniak in der Frühzeit von Ceres entstanden.

WANDERTE DER ZWERGPLANET IN DEN ASTEROIDENGÜRTEL EIN?

Letzteres ist aber nur bei den sehr niedrigen Temperaturen im äußeren Sonnensystem stabil, was wiederum darauf hindeuten würde, dass kieselgroße Objekte aus sonnenfernen Regionen in den Asteroidengürtel gedriftet sind und dort von den Körpern aufgenommen wurden. Oder wanderte Ceres einst aus der Nähe der Neptunbahn in den heutigen Asteroidengürtel ein, wie es De Sanctis zur Debatte stellt? Die Göttlinger Forscher sind da noch zurückhaltender. Die Auswertung der Messungen dauere an, erst danach lasse sich Ceres' Abstammung beurteilen.

Und noch eine wichtige Frage führt die To-do-Liste der *Dawn*-Forscher an: Existiert unter Ceres' fester Kruste ein

Meer, wie es die Planetologen bei Europa entdeckt haben? Zwar ist Ceres viel kleiner als dieser Trabant Jupiters, verglichen mit dem noch kleineren Enceladus, der Saturn umkreist und ebenfalls einen solchen Ozean besitzt, ist der Zwergplanet jedoch relativ groß. Aktuelle Simulationsrechnungen, die allerdings *Dawns* Beobachtungen noch nicht berücksichtigen, lassen es auch für Ceres möglich erscheinen.

Demnach könnte fünf bis 33 Kilometer unter der Oberfläche eine Zone beginnen, in der das Eis geschmolzen ist; die Unsicherheit in dieser Angabe resultiert aus der Bandbreite von Annahmen, die für die Rechnung getroffen wurden. Sollte das hypothetische Meer stark salzig sein, könnte es sogar unter einer noch dünneren Deckschicht existieren. Bis Anfang 2017 haben *Dawns* Augen und die anderen Instrumente an Bord noch die Gelegenheit, Antworten zu finden. Danach wird der Sonde der Treibstoff ausgegangen sein. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Der Zwergplanet Ceres wird seit März 2015 von der Raumsonde *Dawn* umlaufen.
- Ceres ist eine Welt mit einer komplexen Geologie. Manche Krater weisen interessante Strukturen auf, Wassereis hat bei ihrer Entstehung offenbar eine große Rolle gespielt.
- Überall auf der Oberfläche erscheinen weiße Flecken – Salz. Vermutlich besteht es aus wasserhaltigem Magnesiumsulfat oder aus anderen hellen Salzen, wie sie auch in irdischen Salzseen vorkommen.
- Simulationsrechnungen lassen es möglich erscheinen, dass sich unter Ceres' Oberfläche ein Ozean erstreckt.

Tauwetter im Klimarechner

Nirgendwo macht sich der Klimawandel so deutlich bemerkbar wie in der Arktis. Die Menge des Meereises hat hier in den vergangenen Jahrzehnten drastisch abgenommen. Diesen Schwund haben Klimamodelle lange nicht in seinem ganzen Ausmaß erfasst. Das ändert sich nun – nicht zuletzt, weil **Dirk Notz** und seine Forschungsgruppe am **Max-Planck-Institut für Meteorologie** in Hamburg immer besser verstehen, welche Prozesse die Bildung und das Schmelzen des Meereises beeinflussen.

TEXT UTE KEHSE

Jedes Jahr, wenn sich die Polarnacht über den Arktischen Ozean senkt, wächst auf dem klirrend kalten Wasser eine hauchdünne, feste Kruste. Manchmal sind es auch nur einzelne Kristalle, die an der Oberfläche treiben und einen matschigen Brei mit der Konsistenz von Slush-Eis bilden. Nach und nach schließt sich diese Masse zu runden, pfannkuchenförmigen Gebilden zusammen, später entstehen meterdicke Schollen. Am Ende des Winters füllt das Eis fast den gesamten Arktischen Ozean aus, erstreckt sich von Kanada

bis nach Sibirien, schiebt sich durch die Beringstraße und die Baffin Bay, umschließt nahezu ganz Grönland und die Inselgruppe von Spitzbergen. Ende Februar bedeckt das arktische Meereis jedes Jahr rund 15 Millionen Quadratkilometer – eine Fläche, die 1,5-mal so groß ist wie Europa. Im Sommer dagegen schrumpft der weiße Deckel erheblich zusammen.

Und das immer mehr: Seit einigen Jahren ist das Eis stark auf dem Rückzug, 2012 etwa lag die Fläche des Sommerminimums erstmals seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979 bei

weniger als vier Millionen Quadratkilometern. „In den vergangenen 35 Jahren haben sich Fläche und Dicke des arktischen Meereises im Sommer etwa halbiert. Drei Viertel des Volumens sind weg“, konstatiert Dirk Notz, Meereis-Experte am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg. Das Schmelzen hat dramatische Züge angenommen: Die Nordostpassage entlang der sibirischen Küste ist mittlerweile in den meisten Sommern schiffbar, die Eisgrenze verschiebt sich immer weiter nach Norden. Bis Mitte des Jahrhunderts könnte der Arktische Ozean im



Sommer eisfrei sein – das sagen die meisten Klimamodelle voraus.

Das hat erhebliche Folgen für das Weltklima. Obwohl Meereis nur wenige Meter dick ist, liegt es wie ein Deckel auf dem Ozean und verhindert somit weitestgehend, dass im Winter Wärme aus dem Wasser in die Atmosphäre gelangt. Im Sommer dagegen strahlt das helle Eis einen großen Teil des einfallenden Sonnenlichts wieder ins Weltall ab. Beide Effekte kühlen die Luft in den Polargebieten. Verschwindet das Eis, so erwärmen sich die hohen Breiten noch schneller als ohnehin schon. Dadurch

verringert sich der Temperaturunterschied zwischen mittleren und hohen Breiten – dies könnte wiederum für Wetterkapriolen in den gemäßigten Zonen sorgen.

Noch vor zehn Jahren kamen viele Klimamodelle zu dem Ergebnis, dass mit eisfreien Sommern in der Arktis frühestens Ende des 21. Jahrhunderts zu rechnen sei. Doch das Eis ging deutlich schneller zurück, als es die Simulationen vorhergesagt hatten. 2007 etwa schrumpfte die Eisfläche so stark, dass manche Forscher bereits vermuteten, ein Kipppunkt sei überschritten, jen-

Nicht aus-, sondern nur abgesetzt: Dirk Notz und Thorsten Heller, ein Mitglied der Schiffscrew, nehmen eine Probe auf einer Eisscholle. Bei der Expedition schlossen sie sich dem Polarforscher Arved Fuchs an, der aus nostalgischen Gründen mit dem Segelschiff „Ship of Opportunity“ unterwegs war.

seits dessen das Eis binnen weniger Jahre komplett verschwinden könnte. In den folgenden zwei Jahren dehnte es sich jedoch wieder aus – was ebenfalls unerwartet war. Kurzum: Das Meereis verhielt sich so seltsam, dass Klimaforscher es in ihren Modellen nicht in den Griff zu bekommen schienen. >



Großes Kino am Himmel: Die Daneborg-Forschungsstation auf Grönland bot den Max-Planck-Forschern beste Aussichten auf Polarlichter.

Mittlerweile sind die Unterschiede zwischen Modellen und Wirklichkeit sowohl deutlich besser verstanden als auch deutlich kleiner geworden. Dies ist unter anderem Dirk Notz zu verdanken. Seit sieben Jahren leitet er die Forschungsgruppe „Meereis im Erdsystem“ am Hamburger Max-Planck-Institut. Er und seine Kolleginnen und Kollegen widmen sich der Frage, welche Zukunft dem Meereis rund um den Nordpol und auf der anderen Seite der Erde, in der Antarktis, bevorsteht.

NEUE MESSINSTRUMENTE FÜR FELDEXPERIMENTE

Das Team verfolgt einen sehr umfassenden Ansatz: Die Forscher haben einerseits das großräumige Auf und Ab des Meereises im Blick, werten Satellitendaten aus und modellieren diesen Rhythmus mit aufwendigen Computerprogrammen. Zusätzlich erforschen sie die Physik des Meereises aber auch im Kleinen: In ihrem Labor beobachten sie, wie sich das Eis verändert, wenn es gefriert oder schmilzt. Die physikalischen Prozesse beschreiben sie mit Modellen.

Sie entwickeln auch neue Messinstrumente und setzen diese bei Feldexperimenten ein. „Dass wir Untersuchungen im Labormaßstab mit globalen Studien und unterschiedliche Methoden kombinieren, ist ein Alleinstellungsmerkmal und die große Stärke unserer Gruppe“, sagt Dirk Notz. „Wir bringen die Welten der Modellierer und der Experimentalforscher zusammen.“

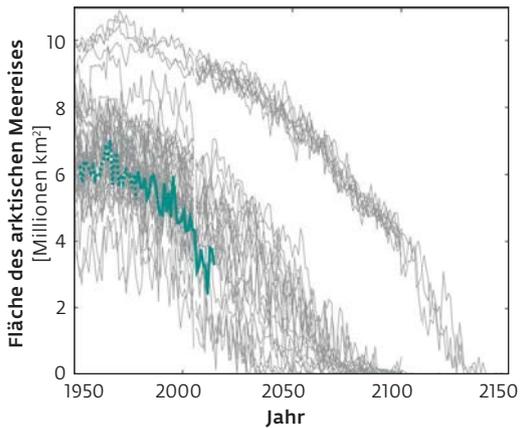
Auf diese Weise verbessern die Forscher die Simulationen der Klimamodelle, wie sich das Meereis global verändert. „Mit unseren Messungen können wir im Kleinen die Prozesse besser verstehen, die das Wachsen und Tauen von Meereis in der Natur beeinflussen“, erläutert Notz. Durch dieses Verständnis können die Forscher dann einschätzen, welche Prozesse in globalen Modellen unbedingt simuliert werden müssen, um vertrauenswürdige Antworten auf zentrale Fragen der Meereisforschung zu erhalten. „Dank unserer Arbeit wissen wir, welche Fragen wir sinnvoll mit unseren Modellen beantworten können, nämlich, zum Beispiel, warum das Meereis in der Antarktis zunimmt, in der Arktis aber schmilzt.“

Der Ort, an dem die Laborexperimente der Gruppe stattfinden, liegt einen kleinen Fußmarsch von Dirk Notz' Büro entfernt. Im 13. Stock des Nachbargebäudes, des Geomatikums der Uni Hamburg, haben Notz und seine Kollegen einen Kühlraum eingerichtet, nicht viel größer als eine Abstellkammer. Den größten Teil dieses Verschlags füllt ein knapp zwei Meter langer, gut einen Meter hoher Wassertank aus. Hier können die Forscher ihr eigenes Meereis züchten und untersuchen. Gleichzeitig testen sie Prototypen selbst entwickelter Messgeräte, die sie später im Feld einsetzen.

„Im Prinzip ist der ganze Raum ein großer Gefrierschrank“, erläutert Dirk Notz. Indem die Forscher die Luft auf bis zu minus 25 Grad herunterkühlen, bringen sie das grünliche Wasser im Tank innerhalb von drei bis vier Tagen von Zimmertemperatur auf Minusgrade. Nach einem weiteren Tag setzt sich auf der Oberfläche genügend Eis für alle möglichen Experimente ab. Mithilfe mehrerer Pumpen können die Forscher das Wasser zum Beispiel gleichmäßig im Kreis strömen lassen oder Wellen erzeugen. Mit Heizplatten an der Seite des Tanks simulieren sie Tauwetter. Schnee kommt aus gewöhnlichen Wassersprühflaschen, Wind von einem Ventilator.

DIE SENSOREN SIND MARKE EIGENBAU

Es wirkt alles ein bisschen improvisiert, doch das stört Dirk Notz nicht. „Es muss nicht schön aussehen, sondern funktionieren“, sagt er. Die gleiche Einstellung hat die Gruppe auch zu Messgeräten. Da es für viele der Größen, die die Forscher im Eis messen wollten, keine passenden Sensoren gab, musste das Team geeignete Messfühler selbst entwickeln. Dirk Notz kommen schon mal Wörter wie „basteln“ oder „hinfrickeln“ über die Lippen, wenn er die Entwicklungsarbeit an den Sensoren beschreibt. „Wir machen alle prakti-



schen Arbeiten selbst, das gehört dazu. Ein wenig praktische Intelligenz braucht man schon“, sagt er.

Die Ergebnisse dieser Entwicklungsarbeit sind weltweit einzigartig. So verfügt die Hamburger Gruppe nun zum Beispiel über ein Messgerät, mit dem der Salzgehalt von Meereis in verschiedenen Tiefen gemessen werden kann. Der Sensor ähnelt einer Harfe. Die kleine Version, die im Experimentiertank zum Einsatz kommt, besteht aus einer Platine und einer Plexiglasplatte, aus

der jeweils im Abstand von einem Zentimeter acht Paare von Drähten herausragen. Zwischen den Drähten wird die elektrische Leitfähigkeit gemessen – woraus sich wiederum der Salzgehalt bestimmen lässt.

„Der Salzgehalt des Meereises ist eine schwer fassbare, aber enorm wichtige Größe zur Charakterisierung des Eises“, berichtet Dirk Notz. Gefriert Meerwasser bei minus 1,8 Grad Celsius, so werden Salz und andere gelöste Stoffe nicht ins Kristallgitter eingebaut, son-

Oben Die Modelle, die im jüngsten Weltklimabericht berücksichtigt wurden, kommen zu sehr unterschiedlichen Vorhersagen für die Bedeckung der Arktis mit Meereis. Die Messdaten von Schiffen und Flugzeugen (gestrichelte grüne Linie) sowie jene von Satelliten (durchgezogene Linie) liegen etwa in der Mitte der zuverlässigsten Simulationen.

Unten Im Hamburger Labor nimmt Dirk Notz (links) eine Eisprobe, während Niels Fuchs die Temperatur der Eisoberfläche misst.





Links Leif Riemenschneider (links im Bild) und ein Mitarbeiter des Teams installieren ein Messinstrument, mit dem sie über die Leitfähigkeit den Salzgehalt des Eises bestimmen, während dieses wächst. Sie tragen Überlebensanzüge für den Fall, dass sie einbrechen.

Rechts Um in möglichst jungem Meereis Experimente machen zu können, sind die Forscher in einem Fjord in Nordost-Grönland mit Hovercraft-Booten unterwegs, die über Eis und durch Wasser fahren.

dem bleiben als hochkonzentrierte Sole in winzigen Taschen und Kanälen innerhalb des Eises übrig, Meereis ist damit immer eine Mischung aus festem Süßwassereis und flüssiger Sole. Weil diese Sole eine höhere Dichte als Meerwasser besitzt, läuft ein Teil von ihr mit der Zeit aus dem Eis heraus und ergießt sich ins Meerwasser. Aus dem Salzgehalt des Meereises leiten die Forscher ab, wie viel Sole noch im Eis verblieben ist. Das ermöglicht wiederum Rückschlüsse auf nahezu sämtliche physikalischen Eigenschaften wie etwa die Wärmeleitfähigkeit und die mechanische Festigkeit des Meereises, die in den Simulationen der globalen Eisentwicklung berücksichtigt werden müssen.

Die Salzsole, die aus dem Meereis herausläuft, spielt zudem eine wichtige Rolle bei der weltweiten Umwälzung der Ozeane – der sogenannten thermohalinen Zirkulation. Die schwere Flüssigkeit erhöht die Dichte des Oberflächenwassers an einigen Stellen in den

Polargebieten immer wieder so sehr, dass es bis zum Grund absinkt und die Tiefsee mit kühlem und sauerstoffreichem Wasser versorgt. Das Auslaufen der Salzsole aus dem Meereis ist somit ein wichtiger Antrieb für diesen Kreislauf, der auch die Meeresströmungen an der Oberfläche in Gang hält.

WIE HÄNGT DER SALZGEHALT VOM ALTER DES EISES AB?

Gründe genug, die komplizierten Vorgänge, die den Salzgehalt des Meereises und die Menge der herausgelaufenen Sole beeinflussen, besser verstehen zu wollen. So war zum Beispiel lange unklar, wie der Salzgehalt vom Alter oder von der Dicke des Eises abhängt. Um diese und andere Zusammenhänge zu ergründen, untersuchten Dirk Notz und sein mittlerweile promovierter Doktorand Philipp Griewank den Salzgehalt nicht nur mit Experimenten, sondern entwickelten auch ein komplexes ein-

dimensionales Modell, um ihn zu beschreiben. Dabei bezogen sie sämtliche physikalischen Prozesse ein, die ihn verändern können. Denn die Struktur und damit der Salzgehalt des Eises entwickeln sich nicht nur beim Wachsen und Tauen, sondern auch wenn es schneit, regnet oder wenn Sonne auf die Oberfläche scheint. Mit ihrem Modell konnten Griewank und Notz gemessene Salzgehalte gut nachvollziehen.

Eine weitere Forschungslücke hat die Meteorologin Ann Kristin Naumann geschlossen. Sie untersuchte während ihrer Masterarbeit in dem Experimentiertank, wie Meereis gefriert, wenn das Wasser von Wellen aufgewühlt oder durch Wind und Strömungen in Bewegung gehalten wird. Über diese Vorgänge war vorher nur wenig bekannt. Naumann musste zunächst eine geeignete Methode finden, um den festen Anteil des breiartigen Eises zu messen, das sich in aufgewühltem Meerwasser heranbildet. Wie die Forscherin feststellte, er-



höht sich der feste Anteil des Matscheises mit der Zeit nicht, auch wenn die Eismasse im Tank insgesamt zunimmt. Solange Matscheis vorhanden ist, besteht nur ein Viertel davon aus festen Eiskristallen – ein Ergebnis, das wichtig ist, um das großräumige Verhalten von Meereis zu verstehen, und das nun in Klimamodelle eingebaut werden kann.

Dirk Notz und seine Kolleginnen und Kollegen haben in ihren Experimenten im Laufe der letzten Jahre zahlreiche weitere Meereisprozesse im Detail untersucht, so etwa das Auftauen und die Vorgänge an der Grenze zwischen Eis und Wasser. Außerdem beschäftigten sie sich mit der Wechselwirkung zwischen Schnee und Meereis. Sie untersuchen etwa, was genau passiert, wenn eine Schneeschicht das Meereis so weit hinunterdrückt, dass die Scholle mit Meerwasser geflutet wird. Das Wasser gefriert dabei und bildet Schneeeis, das in Teilen der Antarktis bis zu 40 Prozent der Meereismenge ausmacht. Ein weiteres Thema ist die Frage, wie Meereis den CO₂-Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre beeinflusst. Das ist von globaler Bedeutung, weil die Weltmeere bislang etwa ein Viertel der

menschlichen CO₂-Emissionen aufgenommen haben.

Einige dieser Prozesse wollen die Forscherinnen und Forscher demnächst auch in Feldexperimenten untersuchen. Dafür haben sie unter anderem eine größere Version der Salzmessvorrichtung gebaut, die im Meereis vergraben wird und anschließend über eine Satellitenverbindung Daten sendet. Ein erster Test in Grönland endete 2013 vorzeitig nach zwei Wochen, brachte aber bereits viele wertvolle Daten. „Jetzt wollen wir erstmals über längere Zeit beobachten, wie sich die Salinität im Meereis mit der Zeit entwickelt“, erläutert Notz. Bislang gibt es zum Salzgehalt von Meereis nur vereinzelte Messungen aus Eisbohrkernen.

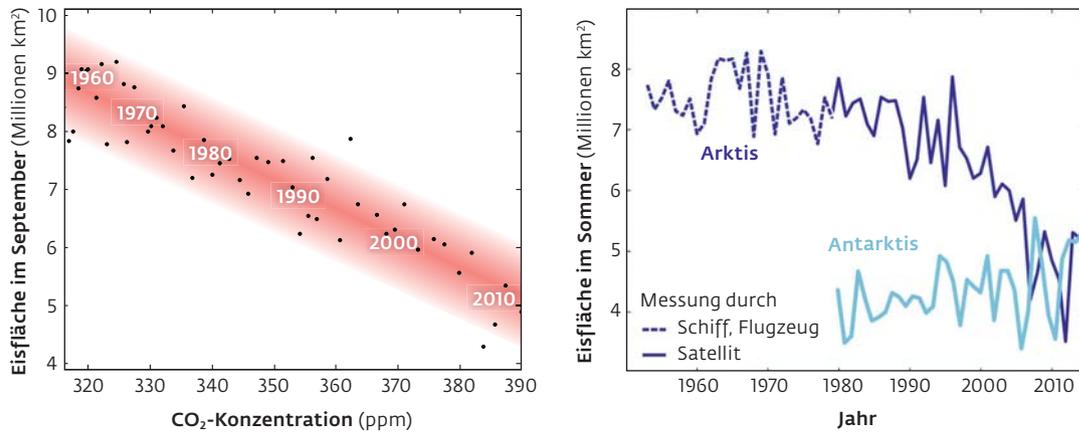
Dafür soll das Salzmessgerät so bald wie möglich zu einem längeren Praxiseinsatz in einem Fjord in Spitzbergen kommen. Außerdem will das Team dort im Eis noch weitere Sensoren platzieren. Sie sollen die Lichtverhältnisse, den pH-Wert, die Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen in verschiedenen Eistiefen messen.

Die Hamburger Forscher tragen somit viele wichtige Details zusammen,

die dabei helfen, die Eigenheiten des Meereises besser zu verstehen – und somit letztlich auch sein großräumiges Verhalten besser simulieren zu können. Auch auf diesem Feld hat Dirk Notz indessen bereits einige Erfolge erzielt. „Indem wir scheinbare Widersprüche zwischen Beobachtungen und Modellsimulationen untersuchten, konnten wir in den letzten Jahren mehrere größere Lücken beim Verständnis von Meereis schließen“, sagt der Meteorologe.

EINE ERKLÄRUNG FÜR DAS ZUNEHMENDE ANTARKTISCHE EIS

Zusammen mit seinen Kollegen Hauke Schmidt und Alexander Haumann fand Dirk Notz zum Beispiel heraus, warum die Meereisfläche in der Antarktis derzeit leicht zunimmt – ein rätselhafter Effekt, der sich in Klimamodellen oft nicht zeigt. Das Ergebnis der Studie, die 2014 in den *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* erschien: Winde, die vom Land her wehen, haben sich am Rossmeer, einer Meeresregion an der pazifischen Seite der Antarktis, in den letzten Jahren verstärkt und treiben das Eis von der Küste weg. „Das Eis wird nach Norden gepus-



Oben Zwischen dem Schwund des arktischen Meereises und dem Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre besteht ein linearer Zusammenhang (links). Alle anderen möglichen Ursachen für den Rückgang konnten Dirk Notz und seine Kollegen ausschließen. Während das Meereis der Arktis in den vergangenen 50 Jahren abgenommen hat, dehnt es sich in der Antarktis leicht aus (rechts).

Rechte Seite Dirk Olonscheck, Dirk Notz und Niels Fuchs (von links) diskutieren jüngste Messergebnisse und beraten über weitere Experimente.

tet, und der Ozean südlich davon friert wieder zu“, erläutert Notz. Vor allem im pazifischen Sektor der Antarktis nimmt die Meereisbedeckung aus diesem Grund zu – trotz der globalen Erwärmung.

In einer weiteren Studie fanden Dirk Notz und einige Kollegen des Max-Planck-Instituts für Meteorologie 2011 heraus, dass es keinen Kippunkt gibt, an dem das Meereis in der Arktis sommers unwiderruflich verschwindet. Zahlreiche Klimaforscher hatten vorher vermutet, dass der Arktische Ozean in einen neuen, im Sommer eisfreien Zustand übergeht, wenn die Eisfläche erst einmal unter eine bestimmte Grenze gesunken ist. Der Eisverlust könnte sich von selbst beschleunigen, so die Befürchtung, da Meerwasser im Sommer mehr Wärme aufnimmt als Eis.

Die Klimasimulation der Hamburger Forscher zeigte jedoch, dass sich das Meereis auch nach einem vollkommen eisfreien Sommer rasch erholt. Denn im Winter gibt der Ozean die zuvor aufgenommene Wärme schnell wieder an die Atmosphäre ab. „Verschiedene Rückkopplungsmechanismen sorgen dafür, dass sich nach ungefähr drei Jahren der alte Zustand wieder einstellt“, erläutert

Dirk Notz. Das bedeutet: Das Meereis in der Arktis passt sich relativ schnell an die herrschenden Klimabedingungen an – und es würde weitgehend stabil bleiben, wenn der Klimawandel gestoppt würde.

NUR DER CO₂-ANSTIEG ERKLÄRT DEN SCHWUND DES EISES

Allerdings wirken sich die zunehmenden Treibhausgaskonzentrationen bereits jetzt ziemlich direkt auf das Meereis aus, wie eine Studie von Dirk Notz und Jochem Marotzke, Direktor am Hamburger Max-Planck-Institut, 2012 offenbarte. Die Forscher werteten dazu Messdaten zur Meereisbedeckung seit den 1950er-Jahren aus. Dabei kamen sie zu dem Schluss, dass der derzeitige Schwund durch natürliche Schwankungen nicht zu erklären ist – er muss eine äußere Ursache haben. Sonneneinstrahlung, Vulkanausbrüche und andere Faktoren konnten die Forscher ausschließen. Nur die steigenden CO₂-Werte blieben als Ursache übrig. „Die Treibhausgase erhöhen die einfallende Wärmestrahlung in der Arktis, was sich unmittelbar auf den Wärmehaushalt des

Meereises auswirkt: Es schmilzt“, erläutert Notz. Die menschlichen Emissionen, das wiesen die beiden Forscher damit nach, sind die unmittelbare Ursache für den Schwund des Meereises.

Darüber hinaus hat sich Notz auch Gedanken darüber gemacht, wieso dieser Eisschwund in vielen Klimasimulationen deutlich langsamer verläuft als in Wirklichkeit. Diese Diskrepanz wird oft als Indiz dafür genommen, dass die Klimamodelle wichtige Prozesse nicht realistisch erfassen. In einem Fachartikel, der 2015 in der Zeitschrift *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS* der britischen Royal Society erschien, kommt Notz aber zu dem Schluss, dass die Modellsimulationen durchaus deutlich von den Messdaten abweichen können, ohne grundsätzlich falsch sein zu müssen. Er weist darin nach, dass die Ausdehnung des Meereises so stark von chaotischen natürlichen Schwankungen beeinflusst wird, dass selbst Modelle, die die zentralen physikalischen Prozesse realistisch beschreiben, deutlich von der tatsächlichen Entwicklung abweichen können.

Auch wenn die Klimamodelle den raschen Rückgang des Meereises in der Arktis teilweise nicht vorausgesagt ha-



ben und immer noch verbessert werden können, müssen sie also nicht prinzipiell falsch sein. „Ich halte diese Studie für eines der wichtigsten Ergebnisse unserer Arbeit, mit Konsequenzen weit über das Meereis hinaus“, erklärt Dirk Notz. Denn die Erkenntnisse, dass die natürlichen Schwankungsbreiten genaue Vorhersagen einer Entwicklung erschweren, lassen sich auch auf andere Größen des Erdklimas wie etwa die Niederschlagsmenge oder die Häufigkeit von Stürmen und Trockenheiten übertragen.

Für die Zukunft hat sich der Hamburger Forscher noch einiges vorgenommen. Er und seine Kollegen bauen die Erkenntnisse aus den Experimenten der Gruppe nun verstärkt in globale Erdsystemmodelle ein, damit diese die Eisbedeckung besser prognostizieren können. Ein anderer Schwerpunkt besteht darin, die Vorgänge an der Grenze zwischen Meereis und Meerwasser besser zu verstehen – etwa wie der Ozean Wärme an das Eis abgibt.

Derzeit macht ihr Forschungsobjekt es ihnen aber nicht gerade leicht: Einige Experimente, die das Team im Januar 2016 im Van Mijenfjord auf Spitzber-

gen geplant hatte, musste es mangels Eis absagen. Auf der arktischen Insel herrschte im Dezember und im Januar mehrere Wochen lang Tauwetter – und dies mitten in der Polarnacht. Vom Meereis, das die Insel im Winter gewöhnlich fest im Griff hat, war keine Spur zu sehen. Und gerade meldete der

National Snow and Ice Data Service aus den Vereinigten Staaten, dass die maximale Ausdehnung des arktischen Meereises im Winter seit Beginn der Messungen noch niemals so gering war wie in diesem Jahr.

Wie es aussieht, nimmt die große Schmelze weiter ihren Lauf. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- In der Arktis ist das Meereis seit Beginn der Satellitenmessungen 1979 stark zurückgegangen. Im Sommer gibt es dort heute sogar nur noch ein Viertel der damaligen Eismenge. Diesen starken Schwund haben Klimamodelle früher ebenso wenig wiedergegeben wie die Zunahme des Eises in der Antarktis.
- Dirk Notz und seine Forschungsgruppe „Meereis im Erdsystem“ verbessern die Simulationen der Klimamodelle, indem sie mit Labor- und Feldexperimenten sowie Modellen alle Prozesse im Großen wie im Kleinen untersuchen, die sich auf die Eismenge in der Arktis und in der Antarktis auswirken. Eine wichtige Größe ist dabei der Salzgehalt des Eises, der von verschiedenen Faktoren abhängt.
- So haben die Forscher festgestellt, dass es für das arktische Meereis keinen Kippunkt gibt, jenseits dessen das Meereis im Sommer dauerhaft verschwindet. Zudem haben sie herausgefunden, warum das Meereis in der Antarktis zunimmt: Stärkere Winde vom Land her treiben das Eis von der Küste weg, sodass sich dort neues bildet.
- Einer weiteren Studie zufolge können Klimasimulationen aufgrund von chaotischen natürlichen Schwankungen der Meereismenge deutlich von Beobachtungen abweichen, ohne notwendigerweise falsch zu sein. Diese Erkenntnis lässt sich auf andere Klimagrößen wie etwa die Niederschlagsmenge oder die Häufigkeit von Stürmen und Trockenheiten übertragen.

Mittlerin zwischen den Welten

Eigentlich wollte **Ayelet Shachar** Architektin werden. Sie wollte Räume schaffen und Menschen ein Zuhause geben. Als Juristin und Politikwissenschaftlerin aber entdeckte sie die Räume des Rechts – und die Möglichkeiten, darin Migranten und Einheimischen das Zusammenleben zu ermöglichen. Jede Gemeinschaft, sagt die Wissenschaftlerin am Göttinger **Max-Planck-Institut zur Erforschung multireligiöser und multiethnischer Gesellschaften**, brauche den Diskurs über Ziele und Identität.

TEXT **MARTIN TSCHECHNE**

Es liegt nahe, gleich über Architektur zu sprechen. Das eher schlichte Gebäude gegenüber der schönen Jugendstilvilla, in der das Max-Planck-Institut zur Erforschung multireligiöser und multiethnischer Gesellschaften in Göttingen residiert, ist eigens für die neue Kollegin um eine Etage aufgestockt worden. Aber noch knirscht dort oben Putzmörtel unter den Schuhen, noch müssen Schreibtische, Bildschirme, Sitzecken, Konferenzräume und Kaffeemaschinen die schneeweiße Raumflucht in einen Arbeitsplatz verwandeln. Und noch steht kein einziges Buch im Regal von Ayelet Shachar.

Ein Tag im Frühjahr 2016. Und natürlich ist jeder Eindruck nur eine Momentaufnahme, auch dieser. Die Kisten aus Toronto werden bald ausgepackt sein, die Bücher einsortiert, und oben werden Mitarbeiter ihre Büros eingerichtet haben. Aber solche Erkenntnis spielt im Leben und in den Arbeiten der in Jerusalem geborenen Wissenschaftlerin ihre Rolle,

vielleicht in diesen Tagen deutlicher als jemals zuvor: Zeit ist die entscheidende vierte Dimension in ihren Konzepten, denen sie in politischer Analyse, ethischer Erörterung und juristischer Gedankenstrenge eine Form gibt und dabei die Baukunst als Vorbild zitiert.

IMMER NEUER BEDARF AN ERKLÄRUNGEN UND LÖSUNGEN

Seit vergangenem Juni ist sie in Deutschland, seit Juli in Göttingen. Dann überschlugen sich die Ereignisse. Immer wieder war ihre Expertise gefragt, immer mehr bedrängte sie neuer Bedarf an Erklärungen und Lösungen, an langfristigen Strategien und schnellem Rat für die Entscheidung von morgen. Sie sehnte sich danach, sagt die Juristin und Politologin und wirkt doch kein bisschen erschöpft, endlich wieder so etwas wie den Alltag eines Forschungsbetriebes aufzunehmen. „Ich kam genau zu der Zeit, in der auch die Flüchtlinge kamen.“

Architektur also. Sie sei praktisch schon auf dem Weg gewesen, erzählt Shachar. Ein paar Jahre lang habe sie davon geträumt, Räume zu schaffen, dreidimensionale Körper und Volumina, die ihre Bewohner behausen und beschützen, ihrem Handeln eine Richtung geben und ihrem Denken Dimension. „Stellen Sie sich eine Kathedrale vor“, sagt sie. „Im Angesicht göttlicher Größe sollten die Menschen sehen, wie klein sie sind. Das war Zweck der Architektur.“ Ihre Idee ist, dass Räume den Menschen Kraft geben.

In den Jahren nach dem Vietnamkrieg waren es die Boatpeople, deren Schicksal die Welt erschütterte. Andernhalb oder zwei Millionen Menschen, die Vietnam entkommen waren; auch die Nachbarländer zeigten sich feindselig. Also ließen sich die Flüchtlinge aufs Meer hinaustreiben, in Schlauchbooten und Fischkuttern, Seelenverkäufern, immer rettungslos überfüllt. Irgendwo würden sie ankommen.

Und wirklich formierte sich eine internationale Gemeinschaft. Schiffe wur-



den ausgeschickt, viele der heimatlosen Vietnamesen wurden gerettet und fanden Asyl in den USA, in Kanada und Japan. Viele auch in Deutschland. Aber mehr als eine Viertelmillion von ihnen ertranken. Ayelet Shachar war eine wache und interessierte junge Frau in Israel. Das Los der Bootsflüchtlinge muss sie bedrückt haben. Irgendwann in dieser Zeit entschloss sie sich, nicht Architektur zu studieren, sondern Jura.

Die Bilder gleichen sich. Heute zeigen sie die Dramen vor der griechischen Küste, die Grenzzäune in Ungarn, die bewaffneten Polizisten an der Pforte zu Mazedonien. Aber können Gesetze ein Zuhause geben? Eine Heimat definieren? Sie können Räume öffnen, erwidert Ayelet Shachar. Das sei schon eine Men-

Räume des Rechts: Als Juristin und Politikwissenschaftlerin beschäftigt sich Ayelet Shachar mit der Frage, wie Staaten dem Phänomen weltweiter Migration einen zeitgemäßen rechtlichen Rahmen geben können. Ihre Arbeit in Göttingen wird auch von der Max-Planck-Förderstiftung unterstützt.



ge. Sie können Sicherheit bieten, ein Zusammenleben regulieren, Kulturen beschützen und am glücklichen Ende das Fundament legen für eine Identität. Stolze Aufgaben für Architekten.

Staatsbürgerschaft und Migration, Grenzen und Flüchtlinge sind ihr Thema. Kollabierende Systeme, fusionierende Kulturen, Biografien ohne Hoffnung, das Grundrecht auf einen Platz zum Leben und auf Teilhabe. Und wenn das einmal geregelt ist, wenn zumindest trockener Boden erreicht und ein vorläufiger Status definiert ist, dann geht es der Forscherin um die Fragen, wie sich Minderheiten integrieren und wie sie integriert werden. Welchen Rang Tradition und Kultur der einen Gruppe gegenüber geltendem Recht der anderen haben. Wie viel Identität einer zum Überleben braucht und wie viel Neustart unvermeidlich ist, wenn alle Koordinaten sich geändert haben.

Es geht um die Frage, warum die Frau aus Syrien es in Ordnung findet, auch in Hamburg ihre Wohnung nur mit Erlaubnis und in Begleitung ihres Mannes zu verlassen. Und wo ein Um-

Recht auf Heimat: Wo ein Kind geboren wurde oder woher seine Eltern stammen, entscheidet bisher über seine Nationalität und damit über seine Chancen im Leben. Ayelet Shachar hält dieses Prinzip für überholt. Sie fordert stattdessen, dass die Lebenswelt eines Menschen seine Staatsangehörigkeit bestimmt.



» Gesetze können Sicherheit bieten, ein Zusammenleben regulieren, Kulturen beschützen und am Ende das Fundament legen für eine Identität.

denken ansetzen sollte: Bei ihr? Bei dem Mann? Bei allen anderen? Shachar hat keinerlei Neigung zum Pathos. Auch in der Architektur liebt sie Licht und klare, funktionale Linien.

Die Fragen kommen jeden Tag. Dürfen Frauen aus Afghanistan vor einem Richter in Europa darauf bestehen, ihren Gesichtsschleier zu tragen? Ist es in Ordnung, wenn Staaten ihre Staatsbürgerschaft mitsamt Wahlrecht wie eine Ware verkaufen? Was ist zu tun, wenn gefälschte Pässe auftauchen oder Menschen aus Tunesien und Marokko sich unter die Flüchtlingsströme aus Syrien und dem Irak mischen? Wie viel Gemeinsamkeit beim Sportunterricht ist Mädchen aus muslimischen Familien zuzumuten, wie viel Sonderstatus den anderen verständlich zu machen?

MILLIONEN MENSCHEN OHNE ANERKENNUNG

Und entspricht es noch der Lebenswirklichkeit in einer globalisierten Welt, die Zugehörigkeit zu einem Gemeinwesen allein nach dem Ort der Geburt oder nach dem legalen Status der Eltern zu definieren? Die Prinzipien des *ius soli* und des *ius sanguinis* sind so alt, dass sie lateinische Namen tragen: das Recht des Bodens und das des Blutes. Es wäre höchste Zeit, argumentiert Shachar, ein *ius nexi* zu verabschieden, ein Recht der Bindung, nach dem die reale Welt eines Menschen über seine Staatsangehörigkeit entscheidet.

Ayelet Shachar erzählt die Geschichte eines jungen Mannes, der zehn Tage nach seiner Geburt mit seinen Eltern in die USA kam. Dort gilt das *ius soli*: Wer auf amerikanischem Boden geboren ist, der ist automatisch Amerikaner. Mit allen Rechten eines US-Bürgers. Die Eltern blieben im Land, ihre zeitlich be-

grenzten Visa liefen ab. Die ganze Familie war illegal. Der Junge ging zur Schule wie alle anderen auch, denn das amerikanische Recht fragt nicht nach der Staatsangehörigkeit, wenn es um Lesen, Schreiben und das kleine Einmaleins geht.

Erst als er sich zum College bewarb, erfuhr der junge Mann, dass er, formal gesehen, gar nicht existierte. Er hatte nie an einem anderen Ort gelebt als in den USA. Er war neugierig und wach, bereit für einen Platz in der Gemeinschaft – aber ein Verlierer im Lotteriespiel um die Rechte, die schon bei der Geburt und allein mit der Herkunft festgeschrieben sind.

Shachars Buch *Multicultural Jurisdictions* über religiöse Vielfalt und Gleichstellung hatte bereits beträchtliches Interesse geweckt. Mit *The Birthright Lottery* festigte sie ihren Ruf als streitbare Denkerin. „Und deshalb“, schließt sie ihr Beispiel ab, „brauchen wir neben den beiden anderen Prinzipien und ergänzend dazu ein *ius nexi*.“ Es sind Millionen Menschen, die ohne Anerkennung leben.

„Hier bin ich. Ich komme aus Kanada, dem Weltzentrum multiethnischer, multireligiöser, multikultureller Vielfalt!“ So stellte sich Shachar den Kollegen von der Max-Planck-Gesellschaft vor. Und vergaß auch nicht, die spezielle Situation in ihrer Geburtsstadt Jerusalem zu erwähnen: die zentralen Stätten der drei monotheistischen Weltreligionen an einem Ort; der ewig schwelende Konflikt dort, die akute Bedrohung durch praktisch sämtliche Nachbarn, die vitale Notwendigkeit von Koalitionen und Kompromissen und die Vielfalt der Wurzeln und Kulturen in der eigenen Bevölkerung: Was blieb einer wie ihr schon anderes übrig, als sich Gedanken zu machen

über Regeln und Grenzen und Chancen des Zusammenlebens in einer so komplexen, vielschichtigen und konfliktträchtigen Nachbarschaft?

Manchmal drängt es die Wissenschaftlerin, eine Antwort zu geben; manchmal auch gibt sie nach, wenn Politiker sie bedrängen. Nein, sagt sie, wenn ein rechtsstaatliches Verfahren es verlangt, müsse man die Frau vor Gericht natürlich davon überzeugen, ihre Burka abzulegen. Schließlich sei es ein Wesensmerkmal des demokratischen Diskurses, sich nicht nur mit Argumenten Gehör zu verschaffen, sondern dabei auch Gesicht zu zeigen.

DIE STAATSBÜRGERSCHAFT VON MALTA FÜR 650 000 EURO

Sie kann erzählen und tut es wie ein guter Reporter. Sie belegt ihre Befunde mit Geschichten und Anekdoten, weil Menschen ihrer Wirklichkeit nun mal im Narrativ aus Bildern und Beispielen eine Struktur geben. Sie pfeift auf den guten Rat mancher Kollegen, in Fachkreisen lieber durch eine Vielzahl einzelner Artikel auf sich aufmerksam zu machen, und bekennt sich freudig zum Ikonoklasmus ihrer Bücher.

Ayelet Shachar ist anders und ist es gern. Und womöglich liegt schon in solcher Lust an Disput und konstruktiver Konfrontation die Vision einer Gesellschaft, die Diversität und Mobilität als Wesensmerkmale ihrer Zeit akzeptiert hat und Chancen daraus entwickelt. In der weniger die Norm zählt als die Idee, weniger die Regel als der Austausch.

Von Kanada und den USA erzählt sie, wo Einwanderung und Integration von Anfang an konstituierende Elemente der Gesellschaften sind – und wo dennoch jede Verhandlung über Zugang und Aufnahme so weit wie mög-



Niemand setzt sich in ein Schlauchboot, um nach Amerika zu paddeln.
Die geografische Lage, die Geschichte, die wirtschaftliche Potenz – alles hat Gewicht.

lich außerhalb der territorialen Grenzen erfolgt; möglichst schon dort, von wo aus die Menschen sich auf den Weg machen. Und natürlich sei es mehr als bedenklich, wenn ein Land wie Malta seine Staatsbürgerschaft für 650 000 Euro feilbiete. Weil damit ohne jede Vereinbarung und Kontrolle eine Hintertür zur Europäischen Union und zum Schengen-Raum sehr weit aufgestoßen werde. Auch die paar kosmetischen Nachbesserungen, der mittlerweile erhöhte Preis und die Forderung nach Residenz im Land änderten nichts an der Verwerflichkeit des Geschäfts. Schon gar nicht für Menschen, die Arges im Schilde führten.

EINE RELATIVITÄTSTHEORIE DER MIGRATION

Kanada ist riesig. Hat aber nur 35 Millionen Einwohner. Und die USA sind nicht, wie Deutschland, umgeben von neun verschiedenen Nachbarn mit neun verschiedenen Vorstellungen von den Ansprüchen ihrer Bürger. Großbritannien ist eine Insel, und Griechenland hat zu viele davon, um sie wirklich schützen zu können. „Stimmt“, sagt Shachar, „*geography matters*.“ Niemand setzt sich in ein Schlauchboot, um nach Amerika zu paddeln. Die geografische Lage, die eigene Geschichte, die wirtschaftliche Potenz: Alles wird in den Verhandlungen sein Gewicht bekommen.

Die sozialen Verpflichtungen des Gemeinwesens gegenüber seinen Bürgern, die Erwartungen derer, die sich auf den Weg machen, ihre Verzweiflung und mögliche Enttäuschung: Jedes Detail wird auf seine Bruchfestigkeit überprüft, jedes kann zur Schwachstelle werden, die ein ganzes System in Gefahr bringt.

„Das tritt nach meiner Kenntnis... sofort, unverzüglich“, stammelte Gün-

ter Schabowski, als er vor den Kameras der westlichen Presse gefragt wurde, ab wann Bürger der DDR ohne besonderes Visum in den Westen ausreisen dürften. Das war am 9. November 1989, und der Parteifunktionär schrieb Weltgeschichte, ohne es zu wissen, ohne es zu wollen. Er wirkte ratlos. Die raschelnden Papiere in seiner Hand gaben ihm keine bessere Auskunft – aber die kleine Unsicherheit im rechtlichen Detail besiegelte das Los seines Landes.

Keine Lösung lässt sich ungeprüft auf den nächsten Fall übertragen, und keine Konstruktion trägt, wenn sie für ein paar Tausend bedauernswerte Flüchtlinge entworfen wurde und plötzlich anderthalb Millionen vor der Tür stehen. Ayelet Shachar agiert in Systemen, deren Wesen und einzige Konstante der Wandel ist. Es gab Zeiten, berichtet sie aus der Geschichte der Vereinigten Staaten, da herrschte dort großer Zweifel, ob Einwanderer aus Italien oder Irland sich jemals integrieren lassen würden.

Und genüsslich wartet die Wissenschaftlerin einen Augenblick, bevor sie die Pointe freigibt: „Heute hegen Amerikaner italienischer oder irischer Abstammung gleiche Vorbehalte gegen die Kubaner. Und wer weiß, vielleicht wird einer von ihnen der nächste oder übernächste Präsident...“

Shachar errichtet ihre Gebäude auf schwankendem Grund. Aber sie empfindet in ihren Expertisen, daraus ein Konstruktionsmerkmal zu machen. Beweisen nicht die Architekten in Japan, dass selbst in Erdbebengebieten Wolkenkratzer wachsen können? Auch die Wissenschaftlerin weiß um die Rolle der Veränderung in ihren Simulationen von Wirklichkeit; Zeit ist die vierte Dimension ihrer Architekturen. So entwickelt und entfaltet sich eine Art Relativitätstheorie der Migration.

Die Formel ist im Grunde einfach: Jedes Detail verändert das Ganze. Jeder abgewiesene Asylbewerber verhärtet die Strukturen unter denen, die ihn fortgeschickt haben. Jeder aufgenommene Flüchtling verändert Ökonomie, Demografie, Kultur, das soziale Gefüge. Niemand kann sagen, wann und wo kritische Werte erreicht und überschritten sind, niemand sich sicher sein, welche Investition sich auszahlen wird. Aber der Wandel lässt sich nicht verhindern, und jede Entwicklung eröffnet neue Chancen.

Die Fragen nach der Burka oder dem Geschäft mit dem Staatsangehörigkeitsrecht bleiben wichtig. Und doch erkennt Ayelet Shachar immer wieder auch die Gefährdung ihrer Rolle, wenn sie allzu kurz angebunden Stellung beziehen soll. Schlagzeilen sind knapp, Gremien haben noch andere Tagesordnungspunkte abzuhaken, und Verhandlungspartner in der Politik suchen eine Lösung, indem sie ein paar Punkte von der Liste des einen und ein paar von der des anderen zu einem vertretbaren Kompromiss zusammenwürfeln.

OLYMPISCHE PRIVILEGIEN FÜR WENIGE

Shachar fasst das ganze Bild ins Auge, nicht seine Pixelpunkte; die Interaktion der Elemente ist es, die sie fasziniert, nicht so sehr die Elemente selbst. Der Eklat um den Erzbischof von Canterbury vor ein paar Jahren war ihr da eine Warnung. In einer Gesellschaft, in der auch Menschen islamischen Glaubens ihre Heimat gefunden hätten, so argumentierte dieser Rowan Williams, müsse notwendig auch ihr Rechtssystem diskutiert werden. Die Scharia in England? Der Aufschrei gellte durch das ganze Land. „Er hatte sich auf einen Artikel von mir berufen“, sagt



Shachar – aber natürlich fiel in den Schlagzeilen alle Analyse unter den Tisch, alle detailliert ausgearbeitete Logik der Argumentation, alle Erörterung systemischer Zusammenhänge.

Politiker agieren wie Politiker, Ayelet Shachar ist Wissenschaftlerin. Studium in Tel Aviv; Promotion an der Yale University; Gastprofessuren in Stanford und Harvard, ein hoch renommierter Lehrstuhl in Toronto; verheiratet mit Ran Hirschl, einem ausgewiesenen Fachmann für vergleichendes Verfassungsrecht; berufen zum Mitglied der Royal Society in Kanada; eingeladen, Direktorin eines Max-Planck-Instituts zu werden. „Suchen Sie bloß nicht nach einer konsequenten Logik in meinem Werdegang“, sagt sie und lacht. „Da ist keine!“

Außer vielleicht der, dass sie immer dorthin gegangen ist, wo sie gebraucht wurde. Weniger auf die einzelnen Baustellen als dahin, wo der große Plan ausgearbeitet wird, die Strategie, das politische Konzept. Der Oberste Gerichtshof in Kanada hat sie angerufen, die Weltbank, jetzt das Europäische Parlament und mancher, der solche Konsultatio-

Angesehene Expertin: Ayelet Shachar ist als Referentin gefragt, aber noch mehr als Beraterin für die Politik. Sie kam im Sommer 2015 an das Göttinger Max-Planck-Institut – zur gleichen Zeit, als Tausende Flüchtlinge über die Balkanroute Deutschland erreichten.



» Keine Lösung lässt sich auf den nächsten Fall übertragen. Ayelet Shachar agiert in Systemen, deren einzige Konstante der Wandel ist.

nen lieber vertraulich führt. Und gibt es einen besseren Ort, über die Wege und möglichen Ziele der aktuellen Flüchtlingskrise nachzudenken, als Göttingen?

Vor dem Bahnhof steht neuerdings ein provozierend leerer Sockel ohne Denkmal. In der Inschrift darauf bedanken sich sieben Professoren der Universität voller Hohn bei ihrem König Ernst August dafür, sie 1837 im Streit um eine freiheitliche Verfassung aus dem Land gejagt zu haben. Die Brüder Jacob und Wilhelm Grimm gehörten zu ihnen. Ihr Weltruhm als Sprachforscher, Märchensammler und Stifter einer deutschen Identität wirft sein Licht heute auf das nahe gelegene Kassel und auf Berlin. Den Göttingern bleibt trotziger Spott – denn natürlich bezieht sich der Klotz auf das pompöse Reiterstandbild vor dem Bahnhof der Landeshauptstadt Hannover, auf dessen identischem Sockel ein treues Volk vor seinem Landesvater den Diener macht.

Ayelet Shachar muss schmunzeln, als sie die Geschichte hört. So etwas gefällt ihr: eine knappe Formulierung, ein Bild, das bestätigt, was sie den Hitzigen zu bedenken gibt, wenn sie wieder mal versuchen, ihr die Bestätigung einer vorgefassten Haltung zu entlocken. Manchmal rät eben auch Eigennutz dazu, ein bisschen eingehender über einen Ort nachzudenken, an dem Menschen ein Zuhause finden können. In Kassel haben sie damals nicht nur die Brüder Grimm freundlich aufgenommen, sondern zuvor auch die aus Frankreich vertriebenen Protestanten, die Hugenotten – tüchtige, strebsame, dankbare Leute. Und gut 300 Jahre Integrationsgeschichte bestätigen, dass es eine weise Entscheidung war.

Über solchen Zugewinn einer Gemeinschaft durch Migration, über das Für und Wider eines vielleicht schlaue-

en, vielleicht auch eher kurz sightigen Imports von Können und Kompetenz hat die Wissenschaftlerin gerade ein Buch geschrieben. Sein Titel *Olympic Citizenship* lässt eine gewisse Ironie erkennen. Denn natürlich ist es eine Ungerechtigkeit, Hunderttausende mit Stacheldraht auszugrenzen und zugleich anderen olympische Privilegien zu versprechen – weil sie komplexe Computerprogramme entwerfen oder mit besonderer Übersicht Fußball spielen können.

NICHT MAUERN, SONDERN BRÜCKEN BAUEN

Doch der Startschuss zum *race for talent*, dem Wettlauf um hochqualifizierte oder anpassungswillige Leute, ist gefallen. Längst beklagen skeptische Geopolitiker, Demografen und Ökonomen den Verlust von Arbeitskraft in Ländern, die gerade auf Ärzte, Lehrer oder Ingenieure dringend angewiesen wären. Aber längst auch produzieren Länder wie die Philippinen ganz gezielt für den globalen Markt. Und was Seeleute, Bauarbeiter und gut ausgebildete Krankenschwestern an ihre Familien in der Heimat überweisen, das gehört zu den fest einkalkulierten Aktivposten ihrer Volkswirtschaft.

Es geschieht. Die Migranten zahlen ihren Preis. Er ist verdammt hoch. Und Regierungen wissen um den Wert der Ressource Mensch. Als die Regierung Schröder im Jahr 2000 damit scheiterte, IT-Spezialisten vor allem aus Indien mit großzügigen Zusagen anzulocken, da lag es nicht allein am schlechten Wetter in Deutschland und daran, dass die Greencard nicht so attraktiv leuchtete wie bei der Konkurrenz – der Versuch kam einfach zu spät. Die Menschenströme waren auf dem Weg. Und

so viele hatten ihr Studium in Harvard oder Yale, in Stanford, am Caltech oder am MIT aufgenommen, abgeschlossen und ihren Platz an der Wall Street oder im Silicon Valley gefunden.

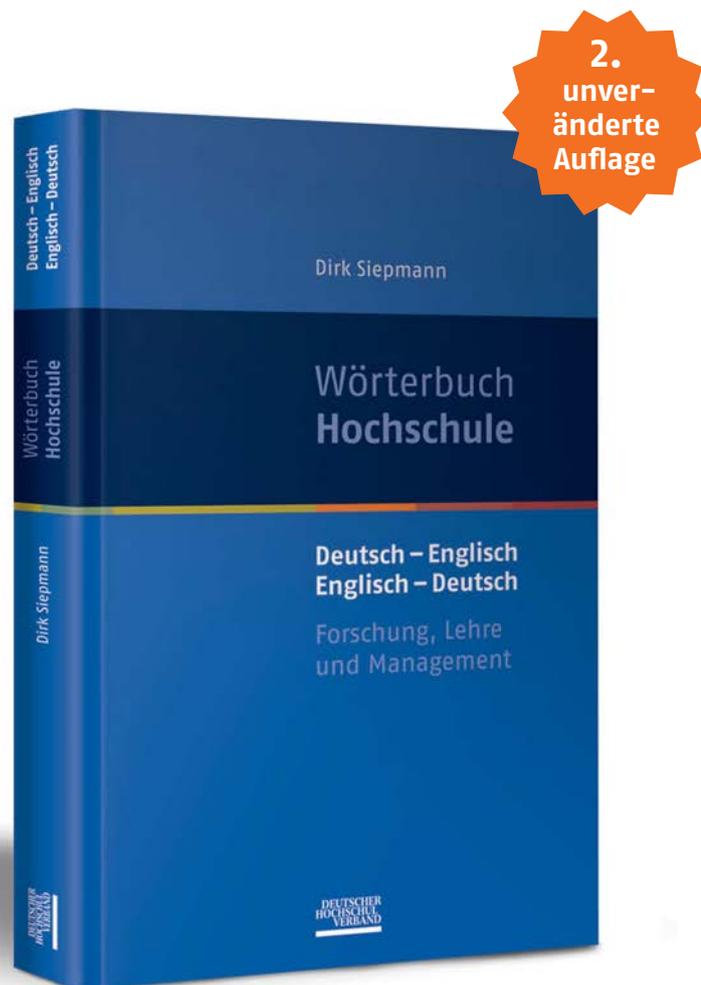
Morgen wird die Welt anders aussehen, da hat die Wissenschaftlerin keinen Zweifel. Morgen werden die Überseekisten ausgepackt sein, ihre Bücher im Regal stehen und die Mitarbeiter in ihrem schönen, weißen Büroflur an der Arbeit sitzen. 60 Millionen Menschen weltweit waren im Jahr 2014 auf der Flucht. Wahrscheinlich sind es inzwischen deutlich mehr geworden. Das Problem weitet sich aus, mit Glück und klugem Zutun lassen sich auch Chancen daraus entwickeln.

Aber längst nicht mehr nur Europa muss auf die großen Wanderungsbewegungen des 21. Jahrhunderts vorbereitet sein. Der Bundesfinanzminister reist nach China, um über die Rollen beider Länder im globalen Bankensystem zu beraten und Gemeinsamkeit auch in der Frage der Migration auszubauen. Dass Banken und Finanzen weltweit verquickt sind, das hat auch der Letzte kapiert. Dass der Betrieb von Kernkraftwerken, die Entsorgung ihres Abfalls, die Schadstoffbelastung der Luft, der Klimawandel und der Waffenhandel nicht allein auf nationalen Foren zu regeln sind, setzt sich als Arbeitsgrundlage internationaler Konferenzen durch.

Das Phänomen der Migration wartet noch darauf, in seiner globalen Dimension erkannt, analysiert und angepackt zu werden. Die Welt braucht tragfähige Konzepte, nicht Mauern, sondern Brücken – und womöglich solche, die zu unterschiedlichen Zeiten in unterschiedlichen Richtungen begangen werden können. Das Fundament dazu legt gute Architektur. Ayelet Shachar denkt nach. ◀

Wissen Sie, wie man „Berufungsliste“, „Blockseminar“ oder „Präsenzstudium“ ins Englische übersetzt?

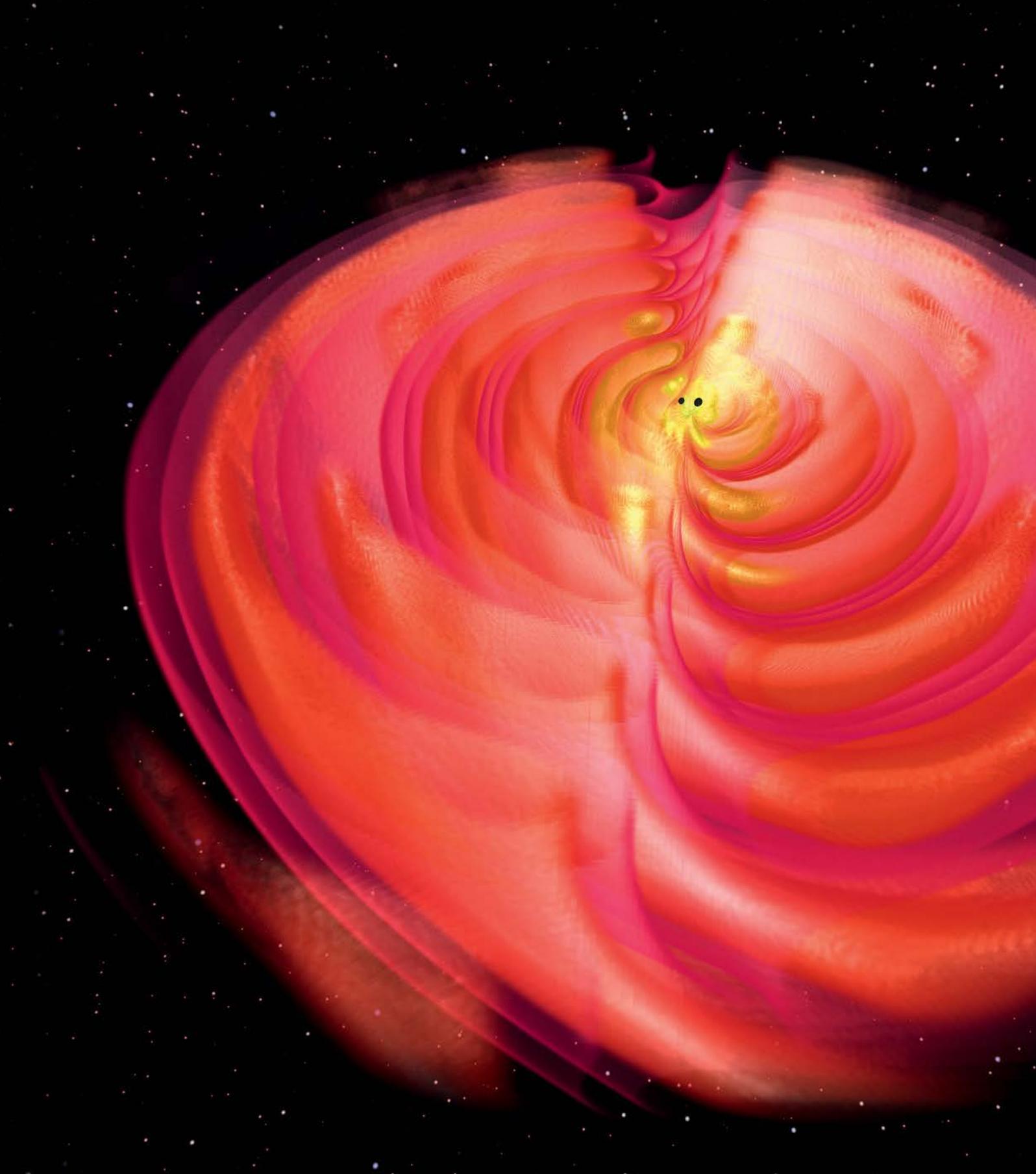
Oder welche Entsprechung der Ausdruck „die Anerkennung von Studien- und Prüfungsleistungen beantragen“ im Englischen findet? Dirk Siepmann | **Wörterbuch Hochschule** | Forschung, Lehre und Management | Deutsch – Englisch | Englisch – Deutsch



Gebundene Ausgabe, 2. unveränderte Auflage 2016, 476 S., 19,90 € (D) inkl. Porto, für DHV-Mitglieder zum Sonderpreis von 17,90 € inkl. Porto | **Zu bestellen über:** Deutscher Hochschulverband, Rheinallee 18-20, 53173 Bonn, Tel. 0228 902 66 66, Fax 0228 902 66 80 oder per Mail: dhv@hochschulverband.de

Dirk Siepmann ist Professor für Fachdidaktik des Englischen an der Universität Osnabrück. Er verfügt über eine jahrzehntelange Erfahrung in Fremdsprachendidaktik, Übersetzungswissenschaft und Lexikographie.

**DEUTSCHER
HOCHSCHUL
VERBAND**



Kosmische Kollision: Die ersten jemals beobachteten Gravitationswellen stammen von zwei verschmelzenden, rund 1,3 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernten schwarzen Löchern. Forscher des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik haben das Szenario am Computer simuliert.

Der Kosmos bebt

Albert Einstein hatte recht: Gravitationswellen existieren wirklich. Am 14. September 2015 gingen sie ins Netz. Das wiederum hätte Einstein verblüfft, glaubte er doch, sie seien zu schwach, um jemals gemessen zu werden. Umso größer war die Freude der Forscher – insbesondere jener am **Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik**, das an der Entdeckung maßgeblich beteiligt war.

TEXT **HELMUT HORNING**

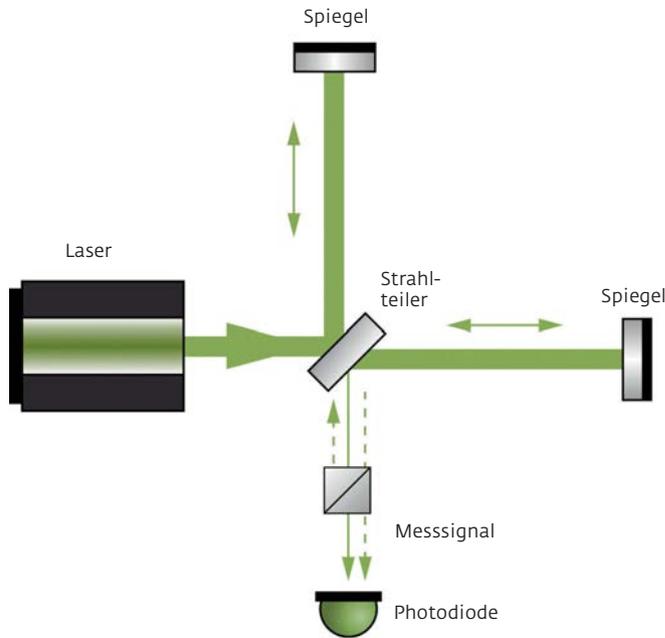
An jenem denkwürdigen Montag im September 2015 zeigt die Uhr in Hannover 11.51 an, als Marco Drago am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik das Signal als Erster sieht. Für etwa eine Viertelsekunde ist die Gravitationswelle durch zwei Detektoren namens Advanced LIGO geschwappt. Die Anlagen stehen Tausende Kilometer entfernt in den USA, eine in Hanford (Bundesstaat Washington), die andere in Livingston (Louisiana).

Drago glaubt zunächst an ein Signal, das absichtlich eingestreut wurde, um die Reaktion der Wissenschaftler zu testen. Das ist in der Vergangenheit immer wieder einmal vorgekommen. Doch Advanced LIGO läuft noch gar nicht im regulären Betrieb. So informiert Drago seinen Kollegen Andy Lundgren. Die beiden sind sich einig: Die Kurve sieht perfekt aus, das Signal scheint echt zu sein. Die Max-Planck-Forscher ahnen, dass sie eben Zeugen eines historischen Augenblicks geworden sind.

Mit der Entdeckung erreicht die Geschichte der Gravitation ihren vorläufigen Höhepunkt, die allgemeine Relativitätstheorie hat jetzt mit Bravour ihren letzten Test bestanden. Zudem stößt die Messung ein neues Beobachtungsfenster auf. Denn nahezu 99 Prozent des Universums liegen im Dunkeln, senden also keine elektromagnetische Strahlung aus. Mit Gravitationswellen hingegen lassen sich kosmische Objekte wie schwarze Löcher erstmals im Detail untersuchen. Und selbst bis fast zum Urknall zurück werden die Forscher in Zukunft „hören“ können.

Was aber hat es mit den Wellen aus dem Weltall auf sich? Die Wurzeln moderner Gravitationsforschung liegen in der Schweiz. Dort denkt im Jahr 1907 am Berner Patentamt ein „Experte II. Klasse“ intensiv über die Schwerkraft nach: Albert Einstein. Er simuliert Schwerkraft mit Beschleunigung. Denn auch die Beschleunigung erzeugt Kräfte, wie sie etwa in einem schnell anfahrenen Lift auftreten. Wäre dessen Kabine

Grafik: S. Ossokine, A. Buonanno (Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik), Simulating extreme spacetime Projekt, W. Benger (Airborne Hydro Mapping GmbH)



Links Gekreuzte Pfade: Im Gravitationswellendetektor wird ein Laserstrahl am Strahlteiler aufgespalten, von dort laufen die beiden Teilstrahlen senkrecht zueinander die Interferometerarme entlang. An deren Enden werden die Teilstrahlen reflektiert, zum Strahlteiler zurückgeschickt und überlagern sich dort zum Signalstrahl. Dieser trifft dann auf die Photodiode. Die von der Photodiode gemessene Helligkeitsänderung ist ein Maß für die relative Längenänderung der Lichtlaufstrecken.

Rechts Feldforschung: Einer der Detektoren von Advanced LIGO, der in Livingston (US-Bundesstaat Louisiana) seine vier Kilometer langen Arme ausstreckt. Sein Herzstück ist das Zentralhaus mit dem Lasersystem. Der zweite, praktisch baugleiche LIGO-Detektor befindet sich im rund 3000 Kilometer entfernten Hanford (Washington).

schall- und lichtdicht, könnten die Fahrgäste glauben, die Anziehungskraft der Erde habe plötzlich zugenommen.

Die Erkenntnis, dass Gravitation zumindest teilweise eine Frage des Bezugssystems ist, führt Albert Einstein zu revolutionären Ideen, die er nach achtjähriger Arbeit im Herbst 1915 in seiner allgemeinen Relativitätstheorie vorstellt. Diese ist letztlich eine Feldtheorie. In ihr führt die beschleunigte Bewegung von Massen zu Störungen, die sich lichtschnell durch den Raum bewegen – Gravitationswellen.

Wer etwa auf dem Trampolin auf und ab hüpfte, verliert Energie und schlägt in der Raumzeit solche Wellen. Sie sind unmessbar klein, denn ein Mensch hat eine geringe Masse und hüpfte vergleichsweise langsam. Im All dagegen findet man große Massen – und sogar ein Trampolin: die Raumzeit. Darin ist alles in Bewegung, weil kein einziger Himmelskörper in Ruhe an einem Ort verharrt. So beult die Erde bei ihrem Umlauf um die Sonne den Raum aus und strahlt dabei Gravitationswellen mit einer Leistung von 200 Watt ab. Aber auch diese Gravitationswellen sind noch so schwach, dass man sie nicht mit einem Detektor aufspüren kann.

Glücklicherweise gibt es im Universum viel heftigere Erschütterungen der Raumzeit: Wenn zwei Neutronensterne oder schwarze Löcher extrem schnell umeinanderlaufen oder gar miteinander kollidieren. Oder wenn ein massereicher Stern als Supernova explodiert. Solche kosmischen Ereignisse erzeugen Gravitationswellen mit einer Energie von rund 10^{45} Watt.

LICHTWELLEN LÖSCHEN SICH GEGENSEITIG AUS

Gravitationswellen verändern den Abstand zwischen den im Raum enthaltenen Objekten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Das zu messen ist höchst schwierig. Albert Einstein hielt den Nachweis daher für unmöglich. Und doch haben die Wissenschaftler Instrumente ersonnen, denen das gelungen ist. Die Geräte der ersten Generation in den 1960er-Jahren bestanden aus tonnenschweren, mit sensiblen Sensoren bestückten Aluminiumzylindern. Gravitationswellenpulse müssten sie zum Schwingen bringen wie der Klöppel eine Kirchenglocke. Aber trotz hochgezückelter Verstärker brachten solche Resonanzdetektoren keine Ergebnisse.

Daher konstruierten die Forscher noch weit empfindlichere Empfänger, sogenannte Laserinterferometer. Dabei trifft ein Laserstrahl auf einen Strahlteiler und wird dort in zwei Strahlen aufgespalten; einer läuft geradeaus weiter, der andere wird im Winkel von 90 Grad abgelenkt. Am Ende einer jeden Strecke sitzt ein Spiegel, der das Licht wieder auf den Strahlteiler reflektiert. Dieser lenkt die Strahlen nun so um, dass sie sich überlagern, also interferieren, und auf eine Photodiode treffen.

Im Fall von ungestörten Messstrecken schwingen die ankommenden Lichtwellen nicht im Gleich-, sondern im Gegentakt: Wellenberg trifft auf Wellental, die Lichtwellen löschen sich gegenseitig aus. Stört eine Gravitationswelle das System und verändert somit die Messstrecken, geraten die Lichtwellen aus dem Takt. Der Empfänger bleibt nicht länger dunkel – ein Signal erscheint.

Am Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik baute eine Gruppe um Heinz Billing im Jahr 1975 den Prototyp eines solchen Interferometers mit einer Streckenlänge von drei Metern, 1983 einen mit 30 Metern. So wurden die Grundlagen geschaffen für alle fol-



Foto: Caltech / LIGO Laboratory

genden Anlagen dieser Bauart. Vor allem für den Detektor GEO600, der seit Mitte der 1990er-Jahre auf einem Feld nahe Hannover seine 600 Meter langen Arme ausstreckt, haben die Wissenschaftler innovative Techniken entwickelt – sei es die Aufhängung der Spiegel oder die Stabilisierung des Lasers.

„So gesehen, ist Advanced LIGO auch unser Detektor“, sagte Karsten Danzmann am 11. Februar in Hannover anlässlich der offiziellen Bekanntgabe der Entdeckung. Denn die beiden baugleichen Anlagen in den USA stecken voll technischem Know-how aus

Danzmanns Team. Als sie die Erschütterung der Raumzeit registrierten, hatte sich die Länge der jeweils vier Kilometer langen, senkrecht zueinander stehenden Laserlaufstrecken lediglich um den winzigen Bruchteil eines Atomkerndurchmessers verändert.

Um die Gravitationswellensignale im Datenwust zu entdecken, mussten die Wissenschaftler wissen, wonach sie überhaupt suchen sollten. Daher arbeiten die Forscher in der Abteilung von Bruce Allen in Hannover an Programmen, um die Signale zu sehen und zu analysieren. Und die Gruppe von Ales-

sandra Buonanno in Potsdam-Golm hat die Modelle entwickelt, um die Quellen der Wellen besser zu verstehen.

Das am 14. September 2015 aufgefangene Signal kündete von der Verschmelzung zweier schwarzer Löcher mit 29 und 36 Sonnenmassen, 1,3 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt. Dank des engen Zusammenspiels von Experiment, Simulation, analytischer Berechnung und Datenanalyse brachten die Wissenschaftler hier Licht in die dunklen Ecken des Universums. Die Rippel der Raumzeit werden die Astronomie erhellen. ◀

„Das Signal stach sofort ins Auge“

Die Entdeckung von Gravitationswellen am 14. September 2015 krönt eine jahrzehntelange Suche mit ausgeklügelten Methoden. Entscheidenden Anteil am Erfolg hat das **Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik** mit seinen Standorten in Potsdam-Golm und Hannover. Dort forschen die Wissenschaftler an innovativen Techniken sowie an theoretischen Modellen, virtuellen Simulationen und an der Datenanalyse. Über ihre Arbeit sowie Bedeutung und Folgen der Entdeckung sprachen wir mit den Direktoren **Bruce Allen, Alessandra Buonanno** und **Karsten Danzmann**.

Herr Allen, Frau Buonanno, Herr Danzmann: Als Mitglieder eines internationalen Netzwerks von Gravitationswellenforschern, der LIGO-Virgo-Kollaboration, waren Sie und die Mitarbeiter Ihres Instituts maßgeblich an der ersten Messung von Gravitationswellen beteiligt. Herzlichen Glückwunsch!

Alle drei: Vielen Dank!

Haben Sie mit der Entdeckung zu diesem Zeitpunkt gerechnet?

Karsten Danzmann: Nein, überhaupt nicht. Das kam völlig überraschend. Die US-amerikanischen LIGO-Detektoren – sie sind wie unser Detektor GEO600 auch nach dem Prinzip eines Michelson-Interferometers konstruiert – befanden sich Mitte September 2015 nach einer längeren Umbauphase zunächst im Testbetrieb. Der wissenschaftliche Messbetrieb sollte wenige Tage später beginnen. Es wurde noch überprüft, ob die Instrumente wie geplant arbeiten. Das war in der Tat der Fall. Aber dass sie so gut funktionieren und in der Lage sein würden, gleich ein Gravitationswellensignal zu empfangen – das hat niemand erwartet.

Bruce Allen: Das Signal kam am 14. September 2015 am späten Vormittag mitteleuropäischer Sommerzeit herein. In den USA war es Nacht, die Kollegen dort schliefen. So haben es zwei Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik als Erste auf ihrem Bildschirm gesehen – wenige Minuten nachdem die Detektoren angeschlagen hatten. Die beiden untersuchten die Daten für einige Stunden und schickten dann eine erste E-Mail an die Kollaboration. Wir konnten es erst gar nicht glauben. Vor allem war das Signal so stark und sah so perfekt aus, dass wir uns zunächst fragten, ob es tatsächlich echt ist.

Danzmann: Dazu muss man wissen: Zu Testzwecken wird regelmäßig das Eintreffen von Gravitationswellen in den Detektoren simuliert. Zum einen testen wir damit die Funktionsfähigkeit der Geräte, zum anderen überprüfen wir die Detektionskette und stellen sicher, dass die Wissenschaftler unabhängig arbeiten.

Allen: In den ersten Wochen nach der Entdeckung hatten wir tatsächlich Bedenken, jemand könnte ein künstliches Signal injiziert und einfach vergessen haben, uns da-

rüber zu informieren. Wir haben sehr viel Arbeit investiert, um dies ausschließen zu können. Doch am Ende stand dann fest: Das Signal stammt aus dem All. Wir sind Zeugen davon geworden, wie in einer fernen Galaxie zwei schwarze Löcher ineinandergestürzt sind!

Wie kann man sich so ein Signal vorstellen?

Alessandra Buonanno: Das Signal rauschte eine Viertelsekunde lang durch die LIGO-Detektoren. Es sah bemerkenswert einfach aus. Eine Sinuswelle mit zehn bis 15 Zyklen, deren Amplitude zunächst zunahm, dann ihr Maximum erreichte und schließlich abflaute. Unterdessen stieg ihre Frequenz stetig an, bis sie schließlich einen konstanten Wert annahm. Dieses charakteristische Signal lässt sich folgendermaßen erklären: Wenn sich die beiden schwarzen Löcher umrunden, strahlen sie Gravitationswellen ab und verlieren dadurch Energie. Deshalb kommen sie einander immer näher, bis sie kollidieren und miteinander verschmelzen. Dabei entsteht ein massereicheres schwarzes Loch, das noch etwas nachschwingt wie eine Glocke, bevor es zur Ruhe kommt. Vor der Verschmelzung ist die Signalfre-

quenz proportional zur Umlauffrequenz. Die Signalamplitude ist proportional zur charakteristischen Umlaufgeschwindigkeit der beiden Partner des Doppelsystems. Während der letzten Entwicklungsphase entspricht diese nahezu der Lichtgeschwindigkeit. Sobald sich das neue schwarze Loch gebildet hat, bebt es noch ein wenig nach. Dabei sendet es Gravitationswellen bei konstanter Frequenz aus.

Allen: Dass man gerade bei der ersten Detektion aus der Wellenform so direkt auf das Ereignis schließen kann, habe ich nicht erwartet. Ich war davon ausgegangen, dass die ersten Detektionen sehr viel schwächer sein und sich nur mit unseren Analyseprogrammen aus den Daten herausfischen lassen würden. Und auch, dass es schwierig sein würde zu verstehen, was da wirklich passiert. Die Tatsache, dass es sich so deutlich und selbst für das menschliche Auge sichtbar in den Rohdaten abhebt, ist bemerkenswert.

Auch wenn sich das Gravitationswellensignal in diesem Fall offensichtlich leicht mit dem Auge erkennen ließ: Eine fundierte Datenanalyse ist unabdingbar. Wie läuft diese ab, und welche Rolle spielt dabei das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik?

Danzmann: Während die Detektoren laufen, werden die Messdaten kontinuierlich automatisch auf Signale hin durchsucht. Und sobald etwas gefunden wird, werden die Wissenschaftler darüber per E-Mail informiert.

Allen: Die Grundlagen für den Algorithmus, der das aktuelle Signal aufgespürt hat, haben Kollegen von der University of

Florida geschaffen. Er sucht in den LIGO-Detektoren nach einem Ausschlag bei denselben Frequenzen, sodass die Ereignisse in beiden Detektoren zusammenpassen. In unserer Arbeitsgruppe haben wir diesen Code über viele Jahre ausgebaut und verbessert, um speziell Signale von Doppelsystemen mit schwarzen Löchern mittlerer Masse aus den Daten herauszufiltern. Diese Verbesserungen waren mit ein Grund dafür, dass das aktuelle Ereignis entdeckt wurde. Und auch was den Algorithmus zur

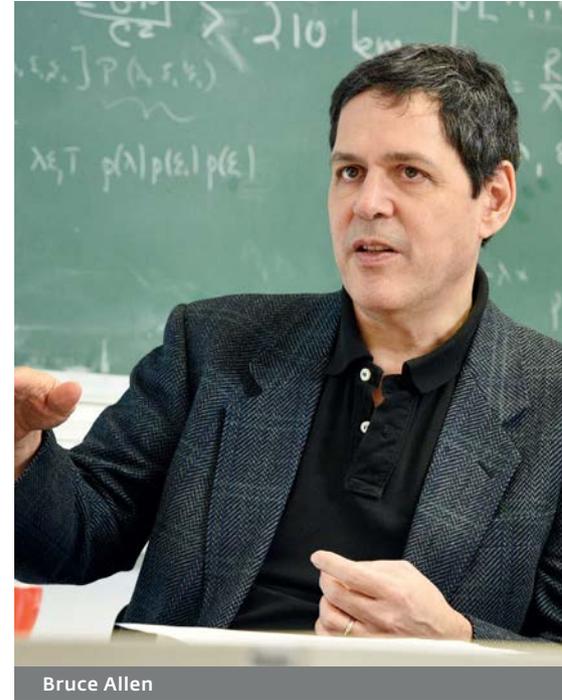
» Gegen Ende der nächsten Messperiode werden wir rund 20 solcher Detektionen haben.

Feinanalyse betrifft, die im Anschluss an die Detektion stattfindet, gehören die Kollegen an unserem Institut zu einer der beiden Expertengruppen weltweit.

Wo werden die Berechnungen durchgeführt?

Allen: Ein Großteil wird am Atlas-Computercluster hier in Hannover gemacht. Er besitzt in etwa dieselbe Kapazität, die innerhalb der übrigen Kollaboration noch einmal zur Verfügung steht.

Danzmann: Nachdem sämtliche äußere Störeinflüsse wie etwa auch Erdbeben ausgeschlossen sind, vergleicht man das Signal mit synthetisch generierten Wellen-



Bruce Allen

formen. So ermitteln wir die Eigenschaften der astrophysikalischen Quelle, die Gravitationswellen aussendet.

Wie lassen sich diese Wellensignale modellieren und in Ihre Suche integrieren?

Buonanno: Zunächst haben wir ausgefeilte analytische Näherungen entwickelt, um die Zweikörperdynamik und die Emission von Gravitationswellen während jener Phase zu beschreiben, in der zwei schwarze Löcher einander immer näher kommen. Dann haben wir numerische Lösungen der allgemeinen Relativitätstheorie von binären schwarzen Löchern verwendet, um die Verschmelzung und die Abklingphase zu



Alessandra Buonanno

» Die beiden schwarzen Löcher sind zu einem einzigen rotierenden schwarzen Loch mit der 62-fachen Sonnenmasse verschmolzen.

simulieren. Es ist unmöglich, bei der Suche und den Folgeanalysen ausschließlich auf Wellenformen zurückzugreifen, die allein mit numerischen Methoden der Relativitätstheorie berechnet wurden. Denn es dauert mindestens einen Monat, um die letzten 15 Umläufe vor der Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern auf diese Weise zu modellieren. Bei der weiteren Suche nach solchen Ereignissen in den LIGO-Daten werden auch die von uns entwickelten Wellenformmodelle verwendet. Die als GW150914 bezeichnete Quelle konnten wir so mit zuverlässiger Signifikanz in den Daten identifizieren.

Und hinterher können Sie genau sagen, wie das gefundene System in Wirklichkeit aussieht?

Buonanno: Nachdem wir das Signal gesehen hatten, haben wir mithilfe unserer Wellenformmodelle Folgeanalysen durchgeführt und die astrophysikalischen Eigenschaften der Quelle daraus abgeleitet. So fanden wir heraus, dass sich das binäre System aus zwei schwarzen Löchern mit 36 und 29 Sonnenmassen zusammensetzte. Die beiden schwarzen Löcher sind zu einem einzigen rotierenden schwarzen Loch verschmolzen, dessen Masse der 62-fachen Sonnenmasse entspricht. Das Doppelsystem befindet sich in einer Entfernung von 1,3 Milliarden Lichtjahren. Zudem war das Signal ziemlich intensiv, sodass wir mithilfe unserer Modelle auch nach Verletzungen der allgemeinen Relativitätstheorie suchen konnten. Wir haben jedoch keine Abweichungen gefunden!

Abgesehen von der Signalstärke: War dieses System noch in anderer Hinsicht eine Überraschung?

Buonanno: Wir wussten nicht, ob schwarze Löcher mit mehr als 20 Sonnenmassen überhaupt existieren. Uns war allerdings klar: Sollte das der Fall sein, wären sie die stärksten Quellen von Gravitationswellen für den LIGO-Detektor. Sie erwiesen sich als die goldenen Quellen, von denen wir immer geträumt haben! Denn das Signal von solch massereichen, verschmelzenden Doppelsystemen schwingt genau in jenem Frequenzbereich, in dem die Detektoren am empfindlichsten sind. Und während sich die schwarzen Löcher vereinigen, ist das Signal am stärksten.

Bei welchen Frequenzen ist das?

Danzmann: Zwischen 60 und 250 Hertz. In diesem Bereich sind die LIGO-Detektoren mittlerweile fast zehnmal so empfindlich wie vor dem Umbau. Darüber freuen wir uns übrigens ganz besonders: Fast alle Entwicklungen, die Advanced LIGO so viel empfindlicher gemacht haben, wurden bei GEO600 ausgetüftelt oder erprobt. Bei höheren Frequenzen, bei denen wir etwa die Signale von zwei verschmelzenden Neutronensternen erwarten, sind die Instrumente derzeit um den Faktor drei besser als zuvor. In den nächsten Monaten soll das noch auf das Zehnfache gesteigert werden. Bei sehr niedrigen Frequenzen dominieren zu sehr die seismischen Einflüsse. Aber diese Lücke wird zukünftig der VIRGO-Detektor in Italien schließen, der auch unserem Netzwerk angehört. Er wird derzeit ebenfalls technologisch modernisiert und soll im kommenden Jahr den Betrieb wiederaufnehmen.

Und wie sieht es mit GEO600 in Ruthe bei Hannover aus?

Danzmann: Dieser Detektor ist bei niedrigen Frequenzen nicht empfindlich genug für solche Signale, da er kleiner ist. Seine Stärke liegt bei höheren Frequenzen. Vor allem gibt es hier aber eine jahrzehntelange Tradition der Technologieentwicklung. Alle Innovationen, die hieraus hervorgegangen sind, finden sich mittlerweile in den anderen Detektoren des Netzwerks wieder, neben speziellen Spiegelaufhängungen etwa auch die Lasertechnologie und überhaupt das optische Layout der Interferometer. Die vorstabilisierten Lasersysteme von Advanced LIGO haben wir als Hardware bereitgestellt. Advanced LIGO ist auch unser Detektor!

Die Entdeckung hat gezeigt, dass das Kalkül, mit der neuen Messempfindlichkeit der Detektoren endlich Gravitationswellen direkt zu messen, aufgegangen ist. Und das sogar

» Wir haben auf einmal ein neues Werkzeug zur Hand, um die dunkle Seite des Universums zu studieren.

früher als erhofft. Welche weiteren Entwicklungen und Beobachtungen erwarten Sie in näherer Zukunft?

Allen: Gerade kurzfristig könnte es nun besonders spannend werden. Wir haben jetzt ein System sehr gut beobachtet. Ich schätze mal, dass wir während des nächsten sechsmonatigen Wissenschaftsbetriebs nach einer weiteren, kürzeren Umbauphase im Laufe des Jahres ein System wie dieses alle drei oder vier Tage sehen. Gegen Ende der nächsten Messperiode werden wir rund 20 solcher Detektionen haben. Wir werden sehen können, wie das Massenspektrum solcher Systeme beschaffen ist. Und wir werden etwas über die Entwicklung solcher Systeme lernen, denn einige von ihnen werden näher sein, andere weiter entfernt, das heißt: zu einem früheren Zeitpunkt entstanden sein. So werden wir zum Beispiel etwas über den Anteil schwerer Elemente im Universum zu den verschiedenen Epochen erfahren. Denn das beeinflusst stark die Entstehungsrate besonders massereicher Sterne und schwarzer Löcher. Und dann hoffen wir natürlich, all die anderen Arten von Quellen, die zu erwarten sind, auch noch zu finden – die Verschmelzung zweier Neutronensterne oder Kombinationen aus einem Neutronenstern und einem schwarzen Loch.

Welche Bedeutung hat die Entdeckung für die Physik im weiteren Sinne?

Danzmann: Ich denke, die Bedeutung für Physik und Astronomie ist enorm. Nicht so sehr, weil endlich Gravitationswellen nachgewiesen wurden. Daran hat keiner gezweifelt! Aber weil die Gravitationswellenastronomie in den Mainstream der Astronomie gerückt ist. Wir haben auf

einmal ein neues Werkzeug zur Hand, um die dunkle Seite des Universums zu studieren. Man muss sich einmal klar machen, dass mehr als 99 Prozent des Weltalls kein Licht und keine elektromagnetische Strahlung aussenden. Über diesen Teil wissen wir bisher nur, dass er der Schwerkraft unterworfen ist. Das nun untersuchen zu können, darin liegt die größte Hoffnung.

Allen: Nun, zuallererst haben wir gezeigt, dass wir Gravitationswellen direkt messen können. Wir können damit jetzt Wissenschaft betreiben. Und wir sind nun auch in der Lage, die allgemeine Relativitätstheorie bei starken Gravitationsfeldern zu testen. Bis jetzt beweist das vor allem, dass Einsteins Theorie völlig richtig ist. Daher denke ich nicht, dass wir daraus etwas fundamental Neues über die Physik lernen werden. Aber wir haben jetzt eine wunderbare Methode, um diese Gesetze nachzuprüfen.

Buonanno: Diese Entdeckung hat eine solche Tragweite, dass es zum jetzigen Zeitpunkt noch schwierig ist, alle Folgen auf unser Verständnis von Gravitation, Grundlagenphysik und Astrophysik wirklich abschätzen zu können. Diese Beobachtung wird wohl noch für viele Jahre Nachwirkungen auf diese Forschungsfelder haben. Und es ist fantastisch, dass die Bekanntgabe der Entdeckung kurz nach dem hundertjährigen Jubiläum von Einsteins Veröffentlichung über die Existenz von Gravitationswellen erfolgt! Jetzt steht uns ein neues Instrument zur Erforschung des Universums und zur Enthüllung seiner dunklen, extremsten Seite zur Verfügung. Wir haben entdeckt, dass stellare schwarze Löcher existieren, dass sie paarweise – also in Doppelsystemen – vorkommen und



Karsten Danzmann

dass es sich um ziemlich massereiche Gebilde handeln kann. Und ja, die Beobachtung von zwei miteinander verschmelzenden schwarzen Löchern erlaubt es uns zu untersuchen, wie sich die Gesetze der Gravitation unter solch extremen Bedingungen verhalten. So können wir überprüfen, ob die allgemeine Relativitätstheorie auch dann noch gilt.

Allen: Ich denke da auch an das hundertjährige Jubiläum der allgemeinen Relativitätstheorie, das wir im Herbst 2015 in Berlin gefeiert haben. Denn Einstein selber glaubte nicht daran, dass sich Gravitationswellen jemals würden messen lassen, weil sie so schwach sind. Und er glaubte außerdem nicht an schwarze Löcher. Wir haben gezeigt, dass er in beiden Punkten falsch lag. Aber ich denke nicht, dass ihn das gestört hätte. Ich glaube, er hätte sich gefreut! ◀

Interview: Felicitas Mokler

Die Suche nach dem **zarten Zittern**

Gravitationswellen gehören zu den spektakulären Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie von 1915. Aber erst ein halbes Jahrhundert später versuchte der Physiker Joseph Weber sie aufzuspüren. Anfang der 1970er-Jahre stiegen auch **Max-Planck-Wissenschaftler** in dieses Forschungsfeld ein und entwickelten Detektoren der zweiten Generation. Dank der Vorarbeiten dieser Pioniere blieben die Wellen in der Raumzeit keine Hirngespinnste: Im September 2015 gingen sie endlich in die Falle.

TEXT **HELMUT HORNING**

Albert Einstein zweifelte: Gravitationswellen werde man niemals nachweisen können, zu schwach sei das Zittern der Raumzeit! Dabei hatte er selbst ihre Existenz postuliert, denn sie ergibt sich aus seiner im November 1915 vorgelegten allgemeinen Relativitätstheorie. Wenig später – 1916 und 1918 – widmet er diesem Phänomen jeweils eine Veröffentlichung.

Nach zwei Jahrzehnten plötzlich die Wende: „Ich habe zusammen mit einem jungen Mitarbeiter [Nathan Rosen] das interessante Ergebnis gefunden, daß es keine Gravitationswellen gibt“, schreibt Einstein an seinen Kollegen Max Born. Und reicht 1936 bei der renommierten Zeitschrift *PHYSICAL REVIEW* ein Manuskript ein – das ein Gutachter als unbrauchbar an den Autor zurücksendet. Albert Einstein kocht vor Wut ob dieser Blamage, muss aber einsehen, dass seine Argumentation tatsächlich fehlerhaft ist. Seine Zweifel waren unberechtigt.

Und die Fachwelt? Die nimmt von den Gravitationswellen kaum Notiz. Das gilt für die allgemeine Relativitätstheorie insgesamt, die schon seit den 1920er-Jahren ein eher kümmerliches Dasein fristet. Erst nach Einsteins Tod 1955 wächst das Interesse an ihr. Schwarze Löcher oder Quasare rücken jetzt ins Blickfeld der Astrophysiker: exotische Objekte, die sich ohne Einsteins Formeln nicht erklären lassen. Von dieser Renaissance der Relativität profitieren letztlich auch die Gravitationswellen. Wenigstens bei einem Physiker bringen sie eine Saite zum Schwingen: Joseph Weber.

Der 1919 in New Jersey geborene Wissenschaftler forscht an der Universität von Maryland und hat die Idee zu einem simplen Experiment: Er hängt einen tonnenschweren Aluminiumzylinder – etwa eineinhalb Meter lang und 60 Zentimeter dick – in einer Drahtschleife auf und versieht ihn in der Mitte mit Piezosensoren, die Schwingungen registrieren sollen. Die gesamte Versuchsanordnung steckt in einer Vakuumkammer.

Warum aber können Gravitationswellen einen massiven Metallzylinder erzittern lassen? Weil sie den Raum senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung dehnen und stauchen. Stellen wir uns vor, Gravitationswellen würden auf einen kugelförmigen Ballon treffen: Innerhalb von tausendstel Sekunden würden sie ihn zunächst zu einem Ei verformen und anschließend zu einer Wurst auseinanderziehen.

Als Quellen für Gravitationswellen sieht Weber vor allem kosmische Katastrophen innerhalb unserer Milchstraße, eine Supernova etwa. Dabei explodiert ein Stern und schleudert große Massen ins Weltall, während gleichzeitig seine inneren Bereiche in sich zusammenstürzen. Übrig bleiben ein Neutronenstern oder ein schwarzes Loch. Heute wissen wir, dass diese Objekte auch selbst Gravitationswellen erzeugen können – und zwar immer dann, wenn sie als Paare in engen Umlaufbahnen entstehen und miteinander verschmelzen. Die im September 2015 registrierten Wellen stammen von einem derartigen Ereignis: von zwei schwarzen Löchern mit 29 und 36 Sonnenmassen, die sich in einer rund 1,3 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie vereint haben.

Die Reichweite der Weber-Zylinder umfasste nur einen kleinen Bereich innerhalb unserer Milchstraße. Unwahrscheinlich, dass darin eine Supernova hochgeht. Zumal es in der gesamten Galaxie nur zwei bis vier solcher Ereignisse pro Jahrhundert geben soll. Dennoch: 1969 meldet Joseph Weber einen Erfolg. Seine Detektoren in Maryland und am 1000 Kilometer entfernten Argonne National Laboratory sollten tatsächlich Gravitationswellen registriert haben, sogar mehrere pro Woche!

Andere Wissenschaftler bleiben skeptisch. Auch die am Münchener Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik. Hier schlägt im Jahr 1970 die Geburtsstunde der Gravitationswellenforschung in Deutschland. „Damals beschlossen wir, Webers Experiment mit verfeinerter Technik und ausgeklügelter Datenverarbeitung mög-

Gewichtiges Experiment: Mit einem solchen massiven Zylinder aus Aluminium haben Max-Planck-Forscher Anfang der 1970er-Jahre nach Gravitationswellen gefahndet.



lichtst exakt zu wiederholen“, erinnert sich Walter Winkler, der zu den ambitionierten Max-Planck-Forschern gehörte. Die Gruppe um Heinz Billing baut in München und im italienischen Frascati die empfindlichsten Zylinderdetektoren weltweit. Mit ihnen lassen sich noch Längenänderungen von 10^{-15} Zentimetern registrieren. Die Versuche laufen von 1972 bis 1975. Ergebnis: nichts!

Die Weber-Detektoren kommen aus der Mode – und machen einer neuen Methode Platz: der Interferometrie. Die Idee dazu stammt von dem deutsch-amerikanischen Physiker Albert A. Michelson. Im Jahr 1881 wollte er mit einem solchen Gerät in Potsdam die Geschwindigkeit der Erde relativ zum damals vermuteten Äther messen. 90 Jahre später schlagen Philip Chapman, Robert Forward und Rainer Weiss ein derartiges Instrument als Detektor für Gravitationswellen vor. Als Lichtquelle soll ein Laser dienen. Doch die drei US-Forscher kommen wegen Geldmangels nicht weiter.

Wieder tritt die Gruppe aus dem Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik auf den Plan. Als einzige weltweit beginnt sie, mit der neuen Technik zu arbeiten. Deren Prinzip ist einfach: Ein Laserstrahl trifft auf einen Strahlteiler und wird dort in zwei Strahlen aufgespalten; einer läuft geradeaus weiter, der andere wird um 90 Grad abgelenkt. Am Ende einer jeden Strecke sitzt ein Spiegel, der das Licht wieder auf den Strahlteiler reflektiert.

GEO, November 1985



Mit einer drei mal drei Kilometer großen „Antenne“ wollen Forscher des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching Gravitationswellen aus fernen Galaxien einfangen.

Dieser lenkt die Strahlen nun so um, dass sie sich überlagern, also interferieren. Die auf einer Photodiode ankommenden Lichtwellen schwingen jedoch nicht im Gleich-, sondern im Gegenteil: Wellenberg trifft auf Wellental, die Lichtwellen löschen sich gegenseitig aus. Läuft eine Gravitationswelle durch das System, quetscht und dehnt sie den Raum und verändert so die Messstrecken. Die Lichtwellen geraten aus dem Takt. Der Empfänger bleibt nicht länger dunkel – ein Signal erscheint.

Im Jahr 1975 bauen die Münchner Forscher – neben Heinz Billing sind das Walter Winkler, Albrecht Rüdiger, Roland Schilling, Lise Schnupp und Karl Mäischberger – einen Prototyp mit einer Armlänge von drei Metern. Das Licht eines drei Watt starken Argon-Lasers wird darin 150-mal reflektiert. Doch auch dieser Detektor der zweiten Generation hat seine Tücken: Die Lichtfrequenz des Lasers muss extrem stabil sein, außerdem ist seine Grundleistung zu schwach. Zudem verursachen Schwankungen in der Geometrie des Strahls unerwünschte Fehlsignale und lassen Bodenerschütterungen die Spiegel erzittern.

Um alle diese missliebigen Effekte zu reduzieren, entwickeln die Physiker innovative Techniken, ohne die heute keine Gravitationswellenfalle mehr auskommt. Ihre Pionierarbeit setzen sie ab dem Jahr 1983 an einem zweiten Prototyp mit 30 Meter Armlänge fort. Das ist recht kurz. Denn in der tausendstel Sekunde, in



Neue Technik: Kernstück der zweiten Generation von Detektoren sind Laser. Hier arbeiten Walter Winkler (links im Hintergrund) und Karl Mäischberger im Jahr 1977 am Prototyp eines solchen Interferometers.

der eine Gravitationswelle die Messstrecke durchquert, legt das Licht 300 Kilometer zurück. Der Laserstrahl müsste also genauso weit unterwegs sein, um die Welle vollständig zu beobachten. Die Forscher bedienen sich eines Tricks, den sie *delay line* nennen und der darin besteht, dass der Strahlengang „gefaltet“ und, wie oben erwähnt, der Strahl mehrfach zwischen den Spiegeln hin und her geworfen wird.

Trotzdem: Je länger die Messstrecke, desto besser. „Im Jahr 1985 stellten wir daher den Antrag zum Bau eines Detektors mit drei Kilometer Armlänge“, sagt Walter Winkler. „Aber das Projekt stieß in Deutschland auf keinerlei Interesse und wurde folglich nicht genehmigt.“ Genauso ergeht es einer britischen Gruppe. Seit 1977 befasste sie sich an der Universität Glasgow mit ähnlichen Untersuchungen und konstruierte 1980 einen Detektor mit zehn Meter Armlänge. 1986 fand der Antrag der Schotten auf ein großes Interferometer kein Gehör.

Ähnliche Schicksale schweißen zusammen, und so beschließen beide Teams drei Jahre später zu kooperieren. Schon kurz darauf legen sie gemeinsam die Planungen für einen Detektor vor, der im Harz entstehen soll – wiederum erfolglos. Im Jahr 1994 endlich der Durchbruch: Nahe Hannover wird der Bau eines deutsch-britischen Detektors mit einer Armlänge von jeweils 600 Metern endlich Realität. „Herbert Welling von der Universität Hannover schaffte es, seine Kollegen zu überzeugen, die Anlage nach Niedersachsen zu holen“, sagt Winkler.

Karsten Danzmann, erst Gruppenleiter in Garching und heute Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, wird berufen und erhält Mittel vom Land Niedersachsen, der Universität sowie der VW-Stiftung. Mit wenig Geld und großem Einsatz – auch von den Kollegen aus Großbritannien – bringen die Forscher das Projekt auf den Weg.

Am 4. September 1995 erfolgt der erste Spatenstich. Seit 2002 wird der Detektor vom Zentrum für Gravitationsphysik, dem auch das Max-Planck-Institut angehört, gemeinsam mit der Leibniz Universität Hannover und den Universitäten in Glasgow und Cardiff betrieben. Die Anlage dient vor allem als Testlabor für Techniken, die in anderen Detektoren weltweit Eingang finden. Nicht zuletzt gehörte David Shoemaker, Projektleiter von Advanced LIGO, zeitweise der Max-Planck-Gruppe an. Nun hat diese US-amerikanische Anlage mit deutscher Technologie erstmals Gravitationswellen gemessen und damit die jahrzehntelange, hartnäckige Suche nach dem zarten Zittern aus dem All gekrönt.



Unter dem Diktat der Gefühle

Ulrich Schnabel, **Was kostet ein Lächeln?** Von der Macht der Emotionen in unserer Gesellschaft

336 Seiten, Blessing Verlag, München 2015, 21,99 Euro

Seit einiger Zeit hat uns eine regelrechte Emotionswelle erfasst: Im Alltag, in der Beziehung, im Beruf, in der Politik und in der Wirtschaft sind Emotionen verstärkt zum Thema geworden. Und damit sind wir gleichzeitig angehalten, mehr „Gefühlsarbeit“ zu leisten. Diese Bestandsaufnahme nimmt der ZEIT-Redakteur und Publizist Ulrich Schnabel in seinem aktuellen Buch *Was kostet ein Lächeln?* vor. Schnabel, der sich in seinen bisherigen Büchern bereits mit dem Glauben und der Muße beschäftigt hat, widmet sich in seinem neuesten Werk den Chancen und Gefahren von Emotionen im privaten und gesellschaftlichen Leben.

Emotionen sind grundsätzlich das „Schmiermittel unserer Gesellschaft“, schreibt Schnabel. Das Bewusstsein darüber, wo und auf welche Weise Emotionen wirken, könne daher von großem Nutzen sein. Mithilfe positiver Emotionen wie dem Mitgefühl könnten wir im Idealfall beispielsweise engere Bindungen zu unseren Mitmenschen aufbauen. Aber auch negative Emotionen wie Trauer und Schmerzen gehören für den Wissenschaftsjournalisten zu den essenziellen menschlichen Erfahrungen. Diese gelte es trotz einer momentanen „Diktatur des positiven Denkens“, die Schnabel diagnostiziert, zuzulassen.

Gestützt auf zahlreiche wissenschaftliche Studien und Beispiele aus dem Alltag sowie begleitet von Interviews unter anderem mit dem Psychologen Wolfgang Schmidbauer und dem Soziologen Hart-

mut Rosa wagt sich Schnabel auch an die problematischen Auswirkungen dieses „Emotionsdiktats“. Insbesondere im Job sei dies mittlerweile zu spüren: „Wer mit seiner Arbeit unzufrieden ist, sich frustriert oder überlastet fühlt, macht dafür nicht den Vorgesetzten, die Umstände oder gar das kapitalistische System verantwortlich, sondern in der Regel nur eine Person – sich selbst. Denn ganz offensichtlich hat man es dann nicht geschafft, die Arbeit mit Sinn zu füllen, hat nicht positiv genug gedacht, nicht tagtäglich seine eigenen Grenzen überwunden und sich in der beruflichen Tätigkeit nicht ständig selbst verwirklicht.“

In dieser Kritik liegt eine der Stärken des Buchs. Ulrich Schnabel schließt sich nicht den einseitigen Heilsversprechen vieler Emotionsratgeber an, sondern versucht, einen ausgewogeneren und kritischeren Blick auf die moderne Emotionsarbeit zu bieten – insbesondere im Berufsleben. Aber auch im Privaten, vor allem in der Partnerschaft, habe die zunehmende „populärpsychologische Glückspropaganda“ für viel Verunsicherung gesorgt: „Wer es trotz all der Tipps und Strategien nicht schafft, die große Liebe zu leben, fühlt sich leicht doppelt als Versager.“

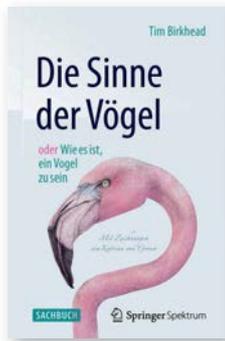
In seiner Darstellung der Rolle von Emotionen in unserem privaten und gesellschaftlichen Leben gelingt es dem Autor, die komplexen wissenschaftlichen Debatten, die das Forschungsgebiet Emotionen begleiten, aufs Wesentliche zu redu-

zieren. Dabei legt er auch die Absurdität offen, welche die Emotionsforschung in ihrem Ringen um Definitionen von Emotionen, Gefühlen und dergleichen ein Stück weit begleitet: „Wie [...] die Geschichte der Emotionsforschung lehrt, ist eine schnelle Einigung auch in diesem Fall kaum zu erwarten: Schließlich wird die Wissenschaft, wie alle menschlichen Unternehmungen, nicht nur von rationalen Erwägungen, sondern mindestens ebenso sehr von Stolz, Eitelkeiten und persönlichem Geltungsbedürfnis angetrieben.“

Allerdings konzentriert sich Schnabel stark auf Studien aus der Psychologie und den Neurowissenschaften. Die Philosophie, die mindestens ebenso viel zu Emotionen zu sagen hat, bleibt außen vor. Auch auf das spannende Themenfeld von Emotionen in der Politik geht Schnabel – abgesehen von einigen kurzen Anmerkungen – nicht ein. Verständlich ist dies im Hinblick auf die Intention des Autors: *Was kostet ein Lächeln?* erscheint als Genrekreuzung zwischen einem populärwissenschaftlichen Überblickswerk und einem kritischen Selbsthilfebuch.

Für diejenigen, die sich bereits ausführlich mit der Rolle und der Wirkmacht von Emotionen im privaten und im öffentlichen Raum auseinandergesetzt haben, wird das Buch daher keine wirklich neuen Erkenntnisse bringen. Für alle anderen bietet es dagegen einen gut recherchierten und lesefreundlichen Einstieg in das Thema.

Anne-Kathrin Weber



Die Trauer der Ringelgans

Tim Birkhead, **Die Sinne der Vögel** oder Wie es ist, ein Vogel zu sein

210 Seiten, Springer Spektrum, Heidelberg 2015, 24,99 Euro

Als Tim Birkhead dieses Buch schrieb, wurde ihm klar, dass er wahrscheinlich mehr Zeit mit Trottellummen (*Uria aalge*) verbracht hat als mit irgendeiner anderen Spezies – *Homo sapiens* in Gestalt seiner Frau miteingerechnet. Der Ornithologe erforscht seit 40 Jahren auf der Insel Skomer vor der Westküste von Südwales Trottellummen und findet, dass sie den Menschen sehr ähneln: Sie sind gesellig, schließen mit ihren Nachbarn Freundschaft, helfen ihnen bei der Jungenaufzucht, sind monogam mit gelegentlichen Seitensprüngen. Und – *nomen est omen* – manchmal, so Birkhead, verhalten sie sich auch wie Trottel. Mit viel Charme beschreibt er ihre „scheinbare Dummheit“ in einer Szene, in der er im steilen Basaltfelsen herumklettert, um die Vögel zu fangen und an ihren Füßen Geolokatoren zu befestigen.

Der Ornithologe hat ein wunderbares Buch geschrieben, in dem sich kenntnisreiche Forschungsberichte mit britischem Humor in einer Weise kombinieren, wie man es sich als Leser kaum besser wünschen könnte. Es geht um die Sinne der Vögel: Sehen, Hören, Tasten, Schmecken, Riechen und den geheimnisvollen Magnetsinn.

Birkhead nimmt uns auf zwei Reisen mit: zunächst eine zurück in die Historie der Ornithologie; dahinter verbirgt sich ein naturgeschichtlicher Streifzug, der offenbart, mit wie viel Liebe und Hingabe die Menschen seit Jahrhunderten versuchen, den Sinnen der Vögel auf die Schliche zu kommen, und dabei vielen Irrtümern auf-

gesessen sind. Die zweite Reise hingegen führt zu den Schauplätzen der aktuellen Forschung mit moderner Technik.

Ein Irrtum, der sich lange hielt, war, dass Vögel nicht riechen können. Stellt man jedoch einem Kiwi Eimer vor die Nase, in denen manchmal Regenwürmer unter einer Schicht Erde versteckt sind und manchmal nicht, erschnüffelt er die Beute sofort und stochert mit seinem langen Schnabel nur dann, wenn es sich lohnt.

Als eine der bemerkenswertesten ornithologischen Erkenntnisse aller Zeiten beschreibt Birkhead, dass Vogelorgane in gemäßigten Breiten enorme jahreszeitliche Veränderungen durchmachen. Hoden werden im Winter winzig, Eileiter zu dünnen Fäden. Und sogar Teile des Gehirns schrumpfen gegen Ende der Brutzeit – nämlich diejenigen, die den Gesang der Männchen steuern –, um im folgenden Frühjahr wieder zu wachsen. Entsprechend schwankt auch die Fähigkeit zu hören. Der Grund: Ein Gehirn auf Touren zu halten ist energieintensiv.

Wenn Riechen und Hören schon nicht einfach zu erforschen sind, wie viel schwieriger ist es dann, Gefühlen auf die Spur zu kommen? Ist es Trauer, wenn eine Ringelgans Tag um Tag neben ihrem erschossenen Partner Wache hält? Charles Darwin hatte keinen Zweifel, dass Tiere fühlen. Das war eine für das 19. Jahrhundert revolutionäre Sichtweise, die wenige Forscher teilten. Noch 100 Jahre später waren Tiere – aus behavioristischer Sicht – Automaten,

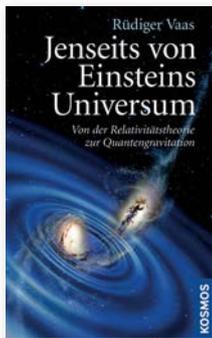
bei denen Reize Verhalten auslösten. Erst in den 1970er-Jahren nahm das Interesse am Bewusstsein der Tiere zu.

Tim Birkhead neigt dazu, Darwin recht zu geben, wobei es ihm keineswegs um romantische Interpretationen des Vogelverhaltens geht, sondern um die Erforschung der physiologischen Grundlagen von Schmerz, Angst oder Lust. Dementsprechend referiert er, wie Forscher „Angst“ in Form des Stresshormons Corticosteron messen, das etwa beim Anblick eines Greifvogels sprunghaft ansteigt. Oder wie sie mithilfe von fMRT-Scans nach „Liebe“ in Form erhöhter Durchblutung in Vogelhirnen fahnden.

Auch wenn wir mittlerweile vieles über seine Sinne wissen, haben wir letztlich keine Ahnung, wie es ist, ein Vogel zu sein. Zum Beispiel ein Flamingo, der wahrnimmt, dass in Hunderten Kilometern Entfernung Regen niedergeht. Oder eine Heckenbraunelle, die mehr als 100-mal am Tag für eine Zehntelsekunde kopuliert. Oder ein Bartkauz, der aufgrund asymmetrischer Ohren in der Lage ist, eine Maus unter einer Schneedecke zu orten.

Mit Birkhead in die Welt der Vögel zu reisen ist ein echtes Erlebnis. Nur schade, dass der Verlag das Buch nicht ordentlich lektorieren ließ, ärgerliche Tippfehler und manch schlecht übersetzter Satz hätten der Korrektur bedurft. Über diesen Frust helfen jedoch die sehr schönen, wenn auch wenigen Zeichnungen hinweg.

Ilona Jerger



In gekrümmten Räumen

Rüdiger Vaas, **Jenseits von Einsteins Universum**, Von der Relativitätstheorie zur Quantengravitation

464 Seiten, Kosmos Verlag, Stuttgart 2015, 24,99 Euro

Am 25. November 1915 legt Albert Einstein der Preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin die letzte von vier Arbeiten vor. Sie hat nur etwas mehr als drei Seiten und trägt den Titel *Die Feldgleichungen der Gravitation*. Einstein stellt darin eine völlig neue Physik vor. Ein paar Monate später erfolgt die erste umfassende Darstellung seines grandiosen neuen Weltgebäudes: *Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie*.

Zum 100. Jubiläum dieses Meilensteins der Wissenschaft lebte Einsteins geniale Arbeit wieder auf – in Symposien, Veranstaltungen und in der populärwissenschaftlichen Literatur. Naturgemäß war nicht jeder Titel, der auf den Markt kam, gleichermaßen inspirierend und qualitativ. Der von Rüdiger Vaas hingegen erfüllt hohe Ansprüche: Der Redakteur bei der Zeitschrift *BILD DER WISSENSCHAFT* präsentiert mit *Jenseits von Einsteins Universum* ein durch und durch sauber und emsig recherchiertes, außergewöhnlich tiefgründiges und erhellendes Buch.

Eine Warnung sei allerdings ausgesprochen: Wer glaubt, die mehr als 450 Seiten schnell und gleichsam en passant durchzulesen, der wird enttäuscht. Der Text erfordert nicht wenig Konzentration und viel aktives Mitdenken. Und es gilt, die eine

oder andere Formel zu durchdringen, deren Abdruck Vaas nicht scheut. Als Belohnung winkt ein solides Verständnis von Relativitätstheorie und Quantengravitation. Zur leichten Orientierung und zum Nachblättern wäre jedoch ein Register mit Personen- und Sachbegriffen hilfreich gewesen.

Im ersten Abschnitt mit der bezeichnenden Überschrift „Revolution von Raum und Zeit“ schildert Vaas die wissenschaftshistorische Entwicklung von Einsteins Gedankenwelt – von der speziellen bis zur allgemeinen Relativitätstheorie, welche die Schwerkraft als eine Eigenschaft der vierdimensionalen Raumzeit beschreibt und damit im Gegensatz zum absoluten Ansatz von Isaac Newton steht.

Dass der Weg zu diesem Geniestreich Einsteins nicht immer geradlinig verlief, verdeutlicht der Autor in dem Kapitel „Der Kampf um die Relativitätstheorie“. Bei der Formulierung der Theorie stieß Einstein auf innere Widersprüche, er hatte es mit gekrümmten Räumen in der nichteuklidischen Geometrie oder völlig unbekannter Mathematik zu tun. Erst nach Umwegen und Sackgassen kam er ans Ziel, und zwar überaus erfolgreich: „Denn diese Theorie, die zugleich Krönung und Abschluss der Klassischen Physik ist wie auch deren Überwindung, begann an den Grenzen

des Vorstellbaren, des Berechenbaren, des Überprüfbareren und steht heute in der Mitte des physikalischen Wissens“, schreibt Rüdiger Vaas.

Ins Zentrum der weltweiten Öffentlichkeit rückte die Theorie im Februar 2016, als Wissenschaftler die Entdeckung von Gravitationswellen bekannt gaben. Mit diesem von Albert Einstein in zwei Arbeiten 1916 und 1918 vorhergesagten Phänomen beschäftigt sich Vaas ausführlich. Unter der Überschrift „Im Schatten der Raumzeit“ befasst er sich aber auch mit vielen äußerst seltsamen und die menschliche Imagination herausfordernden Konsequenzen wie der gravitativen Lichtablenkung oder Zeitdehnung.

Den letzten Abschnitt widmet Vaas dann dem Thema, das dem Buch seinen Titel gab: Angesichts der Erkenntnisse der Quantenphysik, die im Urknall so gar nicht zur allgemeinen Relativitätstheorie passt, drängt sich das Bedürfnis nach einer Theorie von allem auf, an der schon Albert Einstein gescheitert ist. Der wäre heute, so schreibt Vaas, „von vielen dieser Spekulationen wahrscheinlich begeistert gewesen. Oder entsetzt. Aber ganz bestimmt höchst interessiert. Und er hätte sie auf eine Weise weitergedacht oder kritisiert, die den gegenwärtigen Forschern nicht in den Sinn kommt.“ Helmut Hornung

Weitere Empfehlungen

- Franz Miller, **Die mp3-Story**, Eine deutsche Erfolgsgeschichte, 480 Seiten, Hanser Verlag, München 2015, 26 Euro
- Josef H. Reichholf, **Mein Leben für die Natur**, Auf den Spuren von Evolution und Ökologie, 638 Seiten, S. Fischer Verlag, Frankfurt am Main 2015, 26,99 Euro
- Max Tegmark, **Unser mathematisches Universum**, Auf der Suche nach dem Wesen der Wirklichkeit, 608 Seiten, Ullstein Verlag, München 2015, 24 Euro

Standorte

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

Niederlande

- Nimwegen

Italien

- Rom
- Florenz

USA

- Jupiter, Florida

Brasilien

- Manaus

Luxemburg

- Luxemburg



MAX-PLANCK-GESellschaft

Impressum

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

Redaktionsanschrift

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

Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung

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

Redaktion

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

Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)

Gestaltung

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

Litho

KSA Media GmbH
Zeuggasse 7
86150 Augsburg

Druck & Vertrieb

Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstraße 5
97204 Höchberg

Anzeigenleitung

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

MAXPLANCKFORSCHUNG berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den **Max-Planck-Instituten** und richtet sich an ein breites wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemeinverständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (**MAXPLANCKRESEARCH**) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr; die Auflage dieser Ausgabe beträgt 85000 Exemplare (**MAXPLANCKRESEARCH**: 10000 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 22200 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6000 fest angestellte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2016 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.

Forschung leicht gemacht.

Schafft die Papierstapel ab!

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

Internet: www.mpg.de/mpforschung

Kostenlos
downloaden!



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT