

# Max Planck FORSCHUNG



Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft 4.2016

## Extremes Weltall

### STAATSFINANZEN

Steuern, die sich  
in Luft auflösen

### BIOPHYSIK

Zellen auf  
dem Laufsteg

### KOHLNFORSCHUNG

Eine Perspektive  
fürs Leben

### RECHTSGESCHICHTE

Herrschen mit Handbuch  
und Bildstock



**SIEMENS**

*Ingenuity for life*



## **Pictures of the Future**

Das Magazin für Forschung und Innovation

### **Dossier – Die Zukunft der Energieversorgung**

Erfahren Sie hier, wie wir die Abkehr von fossilen Energieträgern bis 2100 erreichen können.

[siemens.de/pof-zukunft-der-energieversorgung](https://www.siemens.de/pof-zukunft-der-energieversorgung)



Foto: Annelies Kusters

## In den Straßen von Mumbai

Eine moderne Großstadt in Indien: Jeden Tag treffen viele Bevölkerungsgruppen aufeinander, unterschiedlichste Sprachen sind zu hören. Und oft müssen Menschen miteinander kommunizieren, die keine gemeinsame Sprache haben. Unwillkürlich wird gestikuliert – und meist versteht das Gegenüber problemlos, was gemeint ist. Doch Gesten können auch definierte Begriffe einer eigenen Sprache sein, der Gebärdensprache von Nicht-Hörenden. Besonders interessant wird es, wenn Gebärdensprache, hier natürlich in der indischen Form, und spontane Gesten nebeneinander und miteinander kombiniert genutzt werden. Genau dies untersuchen Annelies Kusters vom Max-Planck-Institut zur Erforschung multireligiöser und multiethnischer Gesellschaften und ihre Mitarbeiter in den Straßen von Mumbai.

Kusters interessieren das Potenzial, aber auch die Grenzen der Nutzung von Gesten in der Sprache. Dabei bindet die Wissenschaftlerin, die selbst gehörlos ist, insbesondere Nicht-Hörende in die Forschungsarbeit ein. Denn diese können hier ihre große Kenntnis im kreativen Umgang mit Gesten einbringen – sowohl mit definierten wie auch spontanen, in Gesprächen mit Hörenden ebenso wie mit anderen nicht-hörenden Menschen. Die Forscher beobachten und dokumentieren dabei sowohl die Erfahrungen der Hörenden wie auch die der nicht-hörenden Gesprächsteilnehmer in der Kombination von mündlicher, gestischer und schriftlicher Kommunikation. Und sie untersuchen nicht zuletzt auch, welche Rolle die jeweilige Umgebung spielt. Denn natürlich ist es ein Unterschied, ob ein Gespräch auf dem Markt, in einer lauten Straße oder in einem eher ruhigen Umfeld stattfindet.

Hier beobachten zwei Forscher aus Kusters' Team einen nicht-hörenden Geschäftsmann, der mithilfe von Mimik und Gesten mit einem hörenden Ladenbesitzer verhandelt.



# Inhalt



## 18 EXTREMES WELTALL

### 18 Furioses Finale

Supernovae künden von kosmischen Katastrophen. Wenn ein masse-reicher Stern am Ende seines Lebens in die Energiekrise schlittert oder eine bereits gestorbene Sonne mit Materie überfüttert wird, endet das in einer Explosion unvorstellbaren Ausmaßes. Was geschieht dabei im Einzelnen? Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Astrophysik bringen Supernovae im Computer zum Bersten.

### 26 Fallen in der Raumzeit

Schwarze Löcher gehören zum festen Inventar der Science-Fiction-Literatur. Tatsächlich gibt es im Universum kaum einen extremeren Ort. Diese Massemonster verschlucken alles, was ihnen zu nahe kommt. Das klingt recht einfach. Doch die Natur schwarzer Löcher ist vertrackt. Eine Gruppe am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik will das eine oder andere Rätsel der kosmischen Exoten lösen.

### 34 Teilchen auf Touren

Explosionswolken ehemaliger Sterne, schwarze Löcher, Pulsare – diese Himmelskörper beschleunigen Partikel auf enorme Energien und senden hochenergetische Gammastrahlung aus. Mit den beiden Observatorien H.E.S.S. und MAGIC wird dieser extreme Spektralbereich zugänglich. Astronomen an den Max-Planck-Instituten für Kernphysik und für Physik nutzen diese Hightech-Detektoren.

ZUM TITEL In einer klaren Nacht erscheint uns der Sternenhimmel ruhig und friedlich. Doch in Wahrheit ist am Himmel die Hölle los: Sterne saugen von anderen Sternen Materie auf, Sonnen explodieren, und schwarze Löcher verschlingen gierig Gas und Staub. Kurz: Im Universum gibt es jede Menge extreme Orte – die für Forscher einen besonderen Reiz haben.

### 10 Auf der Straße: Demonstranten erinnern daran, dass Apple dem irischen Staat 13 Milliarden Dollar schuldet.

#### PERSPEKTIVEN

- 06 Perlen für die Kanzlerin
- 06 Dreifacher Leibniz-Preis
- 07 „Der Brexit wird aufwendiger, als manche denken“
- 08 Willkommen im Cyber Valley
- 08 Die Kräuselungen im Universum
- 09 Grundsatzerklärung zu Tierversuchen
- 09 Ins Netz gegangen

#### ZUR SACHE

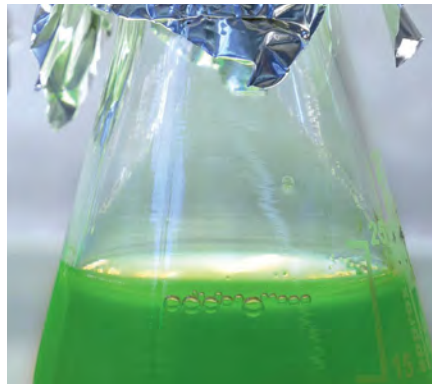
- 10 **Steuern, die sich in Luft auflösen**  
Apple, Starbucks oder Amazon vermeiden seit Jahren erfolgreich, ihre Unternehmensgewinne zu versteuern. Warum ist es für die Staatengemeinschaft so schwer, die Tricks der Konzerne auszuhebeln?

#### FOKUS

- 18 Furioses Finale
- 26 Fallen in der Raumzeit
- 34 Teilchen auf Touren



**56** Auf dem Kopf: Ben List macht fast jeden Tag Yoga – im Labor allerdings nur dem Fotografen zuliebe.



**64** Auf der Suche: Forscher testen verschiedene Enzyme für die künstliche Fotosynthese.



**70** Auf der Wand: Dieses Fresko von 1338 warnt vor schlechten Richtern und ungerechter Herrschaft.

## SPEKTRUM

- 42** Elektronik mit Quantenturbo
- 42** Unser Beitrag zur arktischen Eisschmelze
- 43** Buchstabendreher mit Folgen
- 43** Ein Näschen für Sauerstoff
- 43** So gut entspiegelt wie noch nie
- 44** Vom Licht geleitet
- 44** Affen mit Sprachgefühl
- 45** Das turbulente Herz von Eta Carinae
- 45** Hautstammzellen in Kultur
- 45** An den Grenzen der Mikroskopie
- 46** Ferner Stern ist eine runde Sache
- 46** Wassereis in ewiger Polarnacht
- 47** Der Feind meines Feindes ist mein Freund
- 47** Die schnellste Fliegerin im Tierreich
- 47** Wer sich um andere kümmert, lebt länger

## BIOLOGIE & MEDIZIN

- 48 Zellen auf dem Laufsteg**  
Leben ist Bewegung und Austausch mit der Umwelt – das gilt auch für Zellen. Damit sie von einem Ort zum andern gelangen, müssen sie sich nicht nur fortbewegen können, sie müssen auch mit ihrer Umgebung in Kontakt treten. Forscher untersuchen, wie sie das anstellen.

## MATERIAL & TECHNIK

- 56 Eine Perspektive fürs Leben**  
Zur Person: Ben List

## UMWELT & KLIMA

- 64 Stoffwechsel 2.0**  
Gerade mal 17 Enzyme haben die Wissenschaftler herausgepickt für den ersten künstlichen Stoffwechselweg, der Kohlendioxid in andere organische Moleküle umwandelt. Aber funktioniert der am Reißbrett entworfene Zyklus auch in einer lebenden Zelle?

## KULTUR & GESELLSCHAFT

- 70 Herrschen mit Handbuch und Bildstock**  
Die Eroberung der Neuen Welt fiel den spanischen Konquistadoren überraschend leicht. Doch mit Gewalt und Grausamkeit allein ließen sich die Gebiete nicht regieren. Forscher untersuchen, mit welchen Medien die spanische Krone ihre Herrschaft festigte.

## RUBRIKEN

- 03 Orte der Forschung**
- 16 Post aus Tel Aviv, Israel**  
Auf den Spuren deutsch-israelischer Kulturgeschichte
- 78 Rückblende**  
Der Feind im Huhn
- 80 Neu erschienen**  
80 Ingo Arndt, Jürgen Tautz, GrasArt  
81 Raoul Schrott, Erste Erde Epos  
82 Tanja-Gabriele Schmidt, Mathias R. Schmidt, Rettet die Nacht!  
83 Heather Couper, Nigel Henbest, Space  
84 Ulrich Eberl, Smarte Maschinen  
85 Philip Ball, Designed by Nature  
86 Günter Spanner, Das Geheimnis der Gravitationswellen
- 87 Standorte**
- 87 Impressum**

## BIOMAX

Neandertaler mischen mit – was DNA-Analysen über unsere Frühgeschichte verraten



# Perlen für die Kanzlerin

Wissenschaftler stellen der Politik innovative Projekte vor



Interaktive Präsentation: Martin Wikelski vom Max-Planck-Institut für Ornithologie zeigt Wirtschaftsstaatssekretär Rainer Sontowski, Kanzlerin Angela Merkel und Bundesforschungsministerin Johanna Wanka (von links), mit welch kleinen Sendern er Wege von Tieren nachverfolgt.

Wirtschaftsstaatssekretär Rainer Sontowski war zum einen prominentes Publikum zu Gast im Harnack-Haus der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin, zum anderen präsentierte sich die Forschung in ungewöhnlichem Format: In direkter Interaktion mit ihren Gästen stellten die Wissenschaftler ihre Arbeiten an einem Tisch mit Touchscreen vor. Unter dem Motto „Perlen der Forschung für die Anwendung“ mussten sie diese in wenigen Minuten auf den Punkt zu bringen – prägnant und gut verständlich. Das Spektrum der Themen reichte von Virtual Reality über die Prognose von Erdbeben durch Tiersensoren bis hin zur Früherkennung der Lese-Recht Schreib-Schwäche und der Bekämpfung antibiotikaresistenter Keime. Das Konzept überzeugte. Die Kanzlerin lobte die plastische und verständliche Darstellung der Projekte. Abschließend versprach sie, sich weiterhin für verlässliche finanzielle Rahmenbedingungen für die deutsche Forschung einzusetzen.

Die Vortragsveranstaltung mit Wissenschaftlern der Max-Planck-Gesellschaft und der Fraunhofer-Gesellschaft war in zweierlei Hinsicht ein Novum. Mit Bundeskanzlerin Angela Merkel, Bundesforschungsministerin Johanna Wanka und

## Dreifacher Leibniz-Preis

Ralph Hertwig, Frank Jülicher und Joachim P. Spatz erhalten wichtigste deutsche Wissenschaftsauszeichnung

Wenn die Deutsche Forschungsgemeinschaft die mit jeweils 2,5 Millionen Euro dotierten Gottfried Wilhelm Leibniz-Preise verleiht, werden beim Festakt im März in Berlin auch drei Wissenschaftler der Max-Planck-Gesellschaft dabei sein. Ralph Hertwig, Direktor am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, erhält den Preis für seine wegweisende Forschung über die Psychologie des menschlichen Urteilens und Entscheidens. „Diese Arbeiten erweitern unser Verständnis der Möglichkeiten und Grenzen menschlicher Rationalität“, schreibt die Jury. Mit Frank Jülicher, Direktor am Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, wird ein weltweit führender Wissenschaftler im Bereich der Biophysik ausgezeichnet. Wie die Juroren betonen, verstehe er es, die „universellen

physikalischen Prinzipien in der komplexen Welt der lebenden Materie“ herauszuarbeiten. Außerdem wird Joachim Spatz, Direktor am Max-Planck-Institut für medizinische Forschung, für seine herausragen-

de Arbeit an der Grenze von Materialwissenschaft und Zellbiophysik geehrt. Spatz beschäftigt sich mit der Zelladhäsion, also mit Fragen, wie Zellen sich aneinanderbinden und wie sie auf Oberflächen haften.

Preisträger-Trio: Joachim P. Spatz, Ralph Hertwig und Frank Jülicher (von links)



## „Der Brexit wird aufwendiger, als manche denken“

Jürgen Basedow erklärt, warum den Briten langwierige Verhandlungen bevorstehen und sich erst einmal wenig ändern wird

Im Juni 2016 stimmte die Mehrheit der britischen Bürger für den Austritt Großbritanniens aus der Europäischen Union. Die neue Premierministerin von Großbritannien, Theresa May, kündigte bei ihrem Amtsantritt an, die Entscheidung zügig in die Tat umzusetzen. Und sie versprach: „Die Macht von EU-Gesetzen in diesem Land endet für immer.“ Jürgen Basedow, Direktor am Max-Planck-Institut für ausländisches und internationales Privatrecht, ist der Ansicht, dass europäische Regeln in Großbritannien noch lange fortbestehen werden.

*Herr Basedow, warum können die Briten nicht einfach – wie ein Abgeordneter der Tories es forderte – „anbieten, den zollfreien Handel beizubehalten, einen Brief schreiben und austreten“?*

**Jürgen Basedow:** Großbritannien ist seit 44 Jahren Mitglied der Europäischen Union. Seither wurden weitreichende Verträge geschlossen, es wurden Hunderte von Verordnungen und Richtlinien erlassen. Das betrifft die unterschiedlichsten Bereiche: Es gibt zum Beispiel umfassende Regelungen zum Verbraucherschutz etwa bei der Produkthaftung oder beim Verbot irreführender Werbung. Im Arbeitsrecht gibt es klare Vorgaben, wie die Gesundheit von Arbeitnehmern geschützt werden muss oder welche Rechte Betriebsräte haben. Es gibt gemeinsame Verordnungen zur Sozialversicherung, zum Umweltschutz, zu Insolvenzverfahren, zur Zulassung von Arzneimitteln und so weiter. Wenn die Briten die EU verlassen, müssen sie festlegen, was an die Stelle all dieser Normen tritt.

*Theresa May hat angekündigt, in der nächsten Sitzungsperiode ab Mai 2017 eine „Great Repeal Bill“ ins britische Parlament einzubringen. Was steckt dahinter?*

Zunächst geht es darum, dass in Großbritannien zum Zeitpunkt des Austritts auch das Gesetz aufgehoben wird, mit dem das Land 1972 beim Eintritt die Regeln der EU angenommen hat. Gleichzeitig soll die „Great Repeal Bill“ die europäischen Normen, also vor allem die EU-Verordnungen, in nationales Recht umwandeln. Diese Umwandlung ist ein Gebot der Zeitnot: Nach Artikel 50 des Lissabon-Vertrags sind nur

zwei Jahre für Austrittsverhandlungen vorgesehen. Sobald die Briten offiziell den Antrag auf Austritt stellen, beginnt die Uhr zu ticken. Wenn die Verhandlungen nach 24 Monaten nicht beendet sind und die Frist nicht verlängert wird, treten alle Verträge und Regelungen der EU in England außer Kraft, ohne dass klar ist, welche Vorschriften dann gelten sollen. Für diesen Fall will Theresa May vorsorgen.

*Wenn die EU-Bestimmungen ohnehin in britisches Recht umgewandelt werden, was ändert sich dann für die Briten?*

Die Regelung gibt Unternehmern und Bürgern in Großbritannien erst einmal Rechtssicherheit. Später wird das Parlament entscheiden, ob wirklich alle Normen beibehalten werden oder was geändert werden soll. Allerdings liegen die Schwierigkeiten für die Briten nicht im eigenen Land, sondern in den verbleibenden EU-Staaten: Wenn Großbritannien nicht mehr EU-Mitglied ist, verlieren britische Unternehmen und Dienstleister etliche Vorteile auf dem Kontinent. Anwälte, Finanzberater, Architekten und viele andere dürfen dann nicht mehr ohne Weiteres in Deutschland, Frankreich oder Schweden tätig werden. Besonders deutlich werden sich die Nachteile bei der Rechtsprechung zeigen: Die Entscheidungen britischer Gerichte werden in EU-Ländern nicht mehr automatisch anerkannt. Das betrifft schon so einfache Fälle wie einen Autounfall und die Frage, welche Versicherung zahlen muss.

*Solche Themen wollen die Briten ja in den Austrittsverhandlungen regeln ...*

Das kommt darauf an, wie lange sie verhandeln wollen. Bei der enormen Menge von EU-Regelungen ist das sicher nicht in zwei Jahren zu schaffen. Ich schätze eher, dass die Verhandlungen acht oder zehn Jahre in Anspruch nehmen. Es sei denn, man nimmt ein bereitliegendes Modell, nämlich die Verträge mit Norwegen, Island und Liechtenstein. Allerdings gelten dort alle Verkehrsfreiheiten, also freier Personen-, Waren- und Kapitalverkehr und Dienstleistungsfreiheit. Wobei zum Bereich Personenverkehr auch die Niederlassungsfreiheit und die Freizügigkeit der Arbeitnehmer gehört.



Jürgen Basedow

*Aber genau das wollen die Briten nicht, sie wollen weniger Einwanderung.*

Daher wird das Thema Freizügigkeit sicher der schwierigste Punkt. Theresa May hat angekündigt: „Norway is not a model.“ Auf der anderen Seite wird die EU von den Verkehrsfreiheiten nicht abrücken, da bin ich mir sicher. Daher könnte, wenn die Zeit drängt, das Modell Norwegen doch kommen, zumindest als Zwischenlösung. Ich kann mir fast nicht vorstellen, dass Großbritannien über jeden Rechtsakt einzeln sprechen wird. Zumal die Verhandlungen mit der EU nicht die einzigen sein werden.

*Was kommt noch dazu?*

Die EU hat sehr viele völkerrechtliche Verträge mit Drittstaaten geschlossen, die für Großbritannien nicht automatisch weitergelten, wenn das Land austritt. Das sind Abkommen etwa zur Haftung im Luftverkehr, zum Urheberrecht oder zum Umweltschutz, außerdem viele Handelsabkommen. China hat angekündigt, dass es daran interessiert ist, mit Großbritannien ein Freihandelsabkommen zu schließen, und gleich dazugesagt, dass die Briten 500 Leute bereitstellen sollten, um die Details auszuarbeiten. Das zeigt nicht nur, dass der Brexit viel aufwendiger wird, als manche denken. Es zeigt auch: Die EU ist mehr als der Zusammenschluss der Mitgliedstaaten, sie ist ein Spiel auf Weltebene. Das lässt sich nicht so leicht ersetzen.

Interview: Mechthild Zimmermann

# Willkommen im Cyber Valley

Wissenschaft und Wirtschaft schließen Forschungsk Kooperation im Bereich der künstlichen Intelligenz



Beim Stuttgarter Startschuss: Wissenschaftsministerin Theresia Bauer, Ministerpräsident Winfried Kretschmann, Bosch-Geschäftsführer Volkmar Denner und Max-Planck-Präsident Martin Stratmann (von links).

auf Initiative der Max-Planck-Gesellschaft im Raum Stuttgart-Tübingen das Cyber Valley geschaffen. Den Startschuss für das ehrgeizige Vorhaben gaben der baden-württembergische Ministerpräsident Winfried Kretschmann, Max-Planck-Präsident Martin Stratmann und die weiteren Projektbeteiligten im Dezember. Im Cyber Valley wollen das Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme, das Land Baden-Württemberg, die Universitäten Stuttgart und Tübingen sowie die Unternehmen Bosch, Daimler, Porsche, BMW, ZF Friedrichshafen und Facebook die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz verstärken. Damit entsteht eine der größten europäischen Forschungsk Kooperationen in diesem Bereich. Allein Baden-Württemberg wird in den kommenden Jahren mehr als 50 Millionen Euro in das Projekt investieren.

Intelligente Systeme werden unsere Zukunft prägen: als autonome Fahrzeuge, als Haushaltshilfen oder als winzige Roboter in der Medizintechnik. Um diese Entwicklung voranzutreiben, haben Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft

telligenz verstärken. Damit entsteht eine der größten europäischen Forschungsk Kooperationen in diesem Bereich. Allein Baden-Württemberg wird in den kommenden Jahren mehr als 50 Millionen Euro in das Projekt investieren.

## Die Kräuselungen im Universum

Rainer Weiss, Wissenschaftler am Gravitationswellendetektor LIGO, hält die Harnack-Lecture

Für Rainer Weiss war die Einladung ins Harnack-Haus der Max-Planck-Gesellschaft eine Rückkehr in seine Geburtsstadt. 1932 kam er in Berlin auf die Welt, wenige Jahre später musste seine Familie fliehen. Sie ließ sich schließlich in New York nieder. Seit 1965 ist Weiss Professor am Massachusetts Institute of Technology (MIT) im benachbarten Boston, seit den 1980er-Jahren forscht er an Gravitationswellen. Diese Kräuselungen der Raumzeit hatte Albert Einstein 1916 vorhergesagt. Doch wie sollte man diese winzigen Verzerrungen messen? Nachdem Versuche mit massiven Aluminiumzylindern gescheitert waren, ersannen

die Wissenschaftler eine neue Art von Detektoren: Interferometer. Eine Gruppe aus dem Max-Planck-Institut für



Physik und Astrophysik begann als weltweit einzige mit der neuen Technik zu arbeiten. In den USA war es Rainer Weiss, der das Laserinterferometer weiterentwickelte. Diese Pionierarbeiten schufen die Grundlage für die großen Detektoren, unter anderem für LIGO. In der Harnack-Lecture berichtete der Forscher Mitte Oktober vor 200 Gästen über die Anlage mit Observatorien in Hanford und Livingston. Im September 2015 waren dort erstmals Gravitationswellen ins Netz gegangen.

Renommierter Gast: Rainer Weiss bei der Harnack-Lecture 2016 in Berlin.



# Grundsatzklärung zu Tierversuchen

White Paper betont Unverzichtbarkeit der tierexperimentellen Forschung sowie besondere ethische Verantwortung

Der Senat der Max-Planck-Gesellschaft hat ein White Paper zu Tierversuchen verabschiedet. Es betont die Unverzichtbarkeit von Tierexperimenten in der Grundlagenforschung, bekennt sich aber auch zur besonderen Verantwortung jedes Wissenschaftlers und zu einer Kultur der Fürsorge. Ein weiteres wichtiges Anliegen ist die transparente Darstellung der Versuche gegenüber der Öffentlichkeit. Das Papier entstand nach umfangreichen Beratungen einer international besetzten Kommission. Ihr gehörten renommierte Forscher aus den Lebenswissenschaften an sowie Verhaltensforscher, Ethiker, Kommunikationsexperten und Persönlichkeiten aus der Forschungspolitik. Die Max-Planck-Gesellschaft will sich künftig um die bestmögliche Umsetzung des 3R-Prinzips bemühen. Es steht für *Replacement, Reduction, Refinement* – Ersatz und Reduktion von Tierversuchen sowie eine Minimierung der Belastungen für die Tiere. Ein viertes R für *Responsibility, Verantwortung*, ergänzt das Prinzip. So sollen etwa Empfindungsfähigkeit, Bewusstsein und Intelligenz unterschiedlicher Tierarten erforscht und auf dieser Basis Tierexperimente immer wieder neu bewertet werden.



Schutz aus einer Hand: Die Max-Planck-Gesellschaft will künftig bei Tierversuchen eine Kultur der Fürsorge fördern.

## Ins Netz gegangen



### Ausgezeichnetes Video

Der Max-Planck-Film *Biomaterialien – Patentlösungen aus der Natur*, welcher die Forschung von Peter Fratzl am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung porträtiert, ist von einer internationalen Jury mit dem Technologiepreis 2016 ausgezeichnet worden. Den Preis verleiht das Goethe-Institut aus einer Auswahl von Filmen, die beim jährlichen Science Film Festival gezeigt werden. Das Festival bringt Wissenschaft auf die Leinwand: unterhaltsam, kreativ, spannend – und immer lehrreich. Mit dem Ziel, naturwissenschaftliche Erkenntnisse einem breiten Publikum zugänglich zu machen, genießt es vor allem in Südostasien, Nordafrika und dem Nahen Osten große Aufmerksamkeit. [www.youtube.com/maxplancksociety](http://www.youtube.com/maxplancksociety)

### Herrin der Fliegen ...

... betitelte die FRANKFURTER ALLGEMEINE ZEITUNG im Jahr 1991 einen Artikel über Christiane Nüsslein-Volhard, Direktorin am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie. In jahrelanger Arbeit mit Mutanten der kleinen Taufliege *Drosophila* war es ihr und ihrem Kollegen Eric F. Wieschaus 1980 gelungen, jene genetischen Steuerungsmechanismen auszumachen, die für die Ausbildung der charakteristischen Larvenstrukturen ursächlich sind. Ein neuer Podcast aus der Serie *Echt nobel – die Nobelpreisträger der Max-Planck-Gesellschaft* porträtiert nun die Medizin-Nobelpreisträgerin von 1995. [www.mpg.de/10887980/christiane-nuesslein-volhard](http://www.mpg.de/10887980/christiane-nuesslein-volhard)

### Warum wir mit Tieren forschen

Das Tierversuchportal der Max-Planck-Gesellschaft ist aktualisiert. Zahlreiche Artikel, Hintergrundinformationen, Statistiken und Multimedia-Inhalte erklären, weshalb Tierversuche in der Grundlagenforschung heute und wohl auch in Zukunft unverzichtbar sind, welche Tiere in Versuchen eingesetzt werden und wie Forscher ihrer Verantwortung gerecht werden. Das White Paper zu Tierversuchen und ein Flyer für die Öffentlichkeitsarbeit der Max-Planck-Institute können einfach heruntergeladen werden.

[www.mpg.de/themenportal/tierversuche](http://www.mpg.de/themenportal/tierversuche)

# Steuern, die sich in Luft auflösen

Internationale Konzerne wie Apple, Starbucks oder Amazon vermeiden seit Jahren erfolgreich, Steuern auf ihre Unternehmensgewinne zu zahlen. Im Steuerwettbewerb der Staaten verschieben sie die Gelder in Länder, die niedrige Steuersätze haben und garantieren, nur inländisch erwirtschaftete Gewinne zu versteuern. Unser Autor erklärt, warum es für die Staatengemeinschaft gar nicht so einfach ist, diese Tricks auszuhebeln.

TEXT **WOLFGANG SCHÖN**

**E**s war eine der größten Schlagzeilen der internationalen Presse im Sommer 2016, als die Europäische Kommission verkündete, das Weltunternehmen Apple zu einer Steuernachzahlung in Höhe von mehr als 13 Milliarden Euro verpflichten zu wollen. Empfänger sollte die Finanzverwaltung der Republik Irland sein, wo Apple seit den 1990er-Jahren ungewöhnlich hohe Gewinne in Tochterfirmen „gebunkert“ hat.

---

Schnell war von einem  
*tax war* gegen US-Konzerne und  
den US-Fiskus die Rede

Dass Apple diese Steuerforderung zurückwies, wird niemanden erstaunen. Dass aber auch der irische Fiskus sich weigert, diese Steuern einzutreiben, erscheint schon eher ungewöhnlich. Beide – Finanzbehörden und Unternehmen – behaupten, dass alles mit rechten Dingen zugegangen sei (sprich: Apple alle anfal-

lenden Steuern entrichtet habe). Kann aber das europäische Recht einen Staat zwingen, Steuern zu erheben, auf die er keinen Wert legt?

Die globale Dimension des Problems wird deutlich, wenn man erkennt, dass der Fall auch jenseits des Atlantiks hohe Wellen schlug. Schnell war davon die Rede, dass Europa zu einem *tax war* gegen die US-Industrie und gegen den US-Fiskus aufgerufen habe. Seit Jahren sind auch Amazon, Google und Starbucks mit ähnlichen Verfahren konfrontiert. Und mit besonderem Grimm erfüllte die US-Politik der Umstand, dass Apple möglicherweise verlangen kann, seine in Europa gezahlten Mehrsteuern auf seine Steuerschulden in den Vereinigten Staaten anzurechnen.

Faktisch würden die oben erwähnten 13 Milliarden Euro aus dem US-Budget verschwinden und im irischen Budget wieder auftauchen. Finanzminister Jack Lew und wichtige Vertreter des US-Kongresses protestierten in ungewöhnlicher Schärfe. Und manche Beobachter werteten die kurz darauf lancierte Meldung, dass der Deutschen Bank von der amerikanischen Börsenaufsicht ein Bußgeld in Höhe von etwa 15 Milliarden Dollar wegen Fehlverhaltens an den Kapitalmärkten drohe, als weiteren Schachzug in dieser Auseinandersetzung. >



Angeschwärzt: Im Herbst 2016 ließen Demonstranten in Dublin symbolisch einen Ballon in Form des Apple-Logos steigen. Damit protestierten sie gegen die irische Regierung, die sich weigert, 13 Milliarden Euro Steuernachzahlung einzufordern.

Foto: picture alliance/Pacific Press Agency

Um diesen Konflikt zu verstehen, muss man sich in einem ersten Schritt vergegenwärtigen, warum Irland sich weigert, diese Zahlung durchzusetzen – nicht etwa, weil das Land im Geld schwimmen würde. Der Grund liegt darin, dass Irland seit vielen Jahren darauf setzt, weltweit agierenden Unternehmen ein verlässliches und investitionsfreundliches Steuersystem zu bieten. Zu diesem rechtsstaatlichen Selbstverständnis gehört auch eine Selbstbindung an langfristige Zusagen.

Und eine solche Zusage hat Apple schon vor Jahrzehnten für die Besteuerung seiner irischen Tochterfirmen erhalten. Inhalt dieser Absprache ist, dass die Tochterfirmen nur mit dem Gewinnanteil besteuert werden sollen, der auf ihre (kleine) inländische Produktion in Irland entfällt. Nicht enthalten sind diejenigen (deutlich höheren) Gewinne der Tochterfirmen, die aus der Nutzung der Marke und der Technologie des Apple-Konzerns in den europäischen, afrikanischen und asiatischen Märkten zustande kommen. Diese Gewinne – so stellte sich heraus – wurden nirgendwo besteuert: nicht in den USA (denn

---

## Nur wenn der Fiskus sich nicht an seine eigenen Regeln hält, ist das verbotene Beihilfe

dafür fehlte noch die Ausschüttung an das kalifornische Mutterunternehmen) und nicht in Irland (denn dafür fehlte der Bezug zur inländischen Produktion).

*Stateless income* – staatenloses Einkommen – nennt man in der internationalen Diskussion diese Konzerngewinne, die im Niemandsland zwischen Produktion und Verbrauch „geparkt“ werden. Schätzungen gehen dahin, dass allein US-amerikanische Unternehmen mithilfe dieser Technik mehr als zwei Billionen Dollar an *cash holdings* in Auslandsgesellschaften (vorwiegend in Steueroasen) halten.

In den vergangenen Jahren sind – getrieben vor allem aus der Politik, aber auch aus dem Kreis der *non-governmental organizations* – vielfältige Initiativen auf nationaler und internationaler Ebene ergriffen worden, um diesen Praktiken entgegenzuwirken. So ver-

ständig die Aufregung zu sein scheint, so schwer tut man sich aber, wenn es darum geht, das eigentliche „Übel“ zu identifizieren.

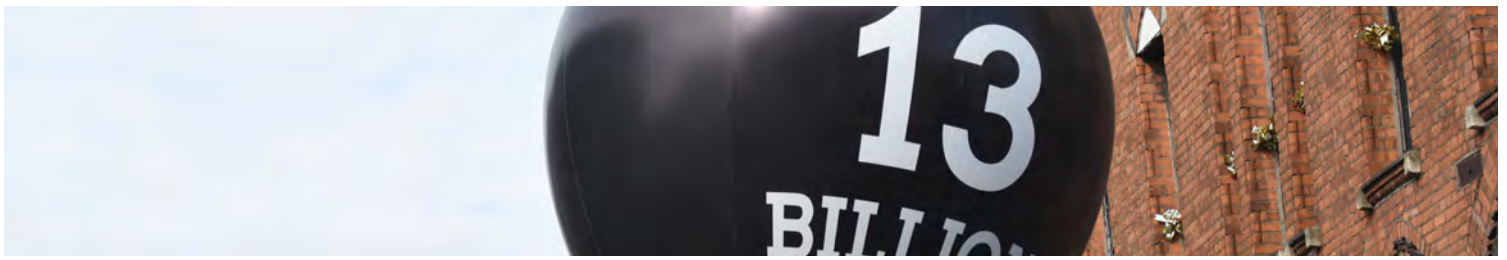
Natürlich denkt man in erster Linie an fiskalische Ausfälle. Wenn Milliardengewinne nirgendwo versteuert werden, fehlt das entsprechende Steueraufkommen in irgendeinem staatlichen Budget. Aber in welchem? In Irland? In den Vereinigten Staaten? Oder sollte man die Gewinne vielleicht dort versteuern, wo die Kunden von Apple sitzen – etwa in anderen europäischen Ländern? Diesen Marktstaaten fehlt aber nach den geltenden Steuerabkommen das Besteuerungsrecht für grenzüberschreitende Liefergewinne. Daher hat etwa Frankreich gefordert, Steuern von Google und anderen Unternehmen in Zukunft kraft „digitaler Präsenz“ erheben zu können. Durchgesetzt hat sich dieser Vorschlag bisher nicht.

Geht es nicht eher um Steuergerechtigkeit? Erleben wir hier wie so oft den Fall, dass die Reichen nichts und die Armen alles zahlen? Gerade dieser Gesichtspunkt wird in Kreisen der Zivilgesellschaft immer wieder betont. Das Problem ist nur: Unternehmen bringen einem Staat und einer Volkswirtschaft nicht nur Steuerzahlungen, sondern auch Investitionen und Arbeitsplätze. Vielfach verzichten Staaten daher freiwillig auf eine hohe Steuerbelastung, um Unternehmen ins Land zu locken.

Gewinner kann dann auch der „kleine Mann“ sein. Und wer will den Unternehmen einen Vorwurf machen, die auf solche fiskalischen Angebote reagieren? Dieser Steuerwettbewerb wird durch die hohe Mobilität von Unternehmensfunktionen zunehmend verschärft: Mobilität von Finanzkapital, Mobilität von immateriellen Gütern und Leistungen, Mobilität von Führungspersonal. Die immobilen Faktoren – namentlich die Arbeitnehmerschaft – können in diesem Wettbewerb nicht mithalten.

Dies führt zum dritten Gesichtspunkt, der ein Störgefühl hervorruft: dem Wettbewerb zwischen Unternehmen. Die Möglichkeit multinationaler Konzerne, vom Steuerwettbewerb zwischen den Staaten zu profitieren, stärkt ihre Position im Wettbewerb mit lokalen Konkurrenten, die eine solche Vorzugsbehandlung nicht genießen können. Das klassische Beispiel ist der örtliche Buchhändler, der seine Kunden an Amazon verliert.

Amazon war lange Zeit in der Lage, über eine Luxemburger Tochtergesellschaft den deutschen Markt



mit Büchern zu beliefern, ohne hier der Körperschaftsteuerpflicht unterworfen zu werden; die in München ansässige Firma Hugendubel kann sich dem jedoch nicht entziehen. Spätestens hier wird der Bezug zwischen dem internationalen Steuersystem und den europäischen Wettbewerbsregeln deutlich.

Die deutsche Bundesregierung hat vor Jahren klar gestellt, dass ihre Mitwirkung in der internationalen Steuerpolitik gerade auch dem Ziel dient, ein *level playing field* für große und kleine Marktteilnehmer herzustellen. Und auch die Brüsseler Kommission hat in ihrer Entscheidung zu Apple vor allem beanstandet, dass Apple in Irland eine steuerliche Behandlung genieße, die nicht in Übereinstimmung mit der Besteuerung unabhängiger Unternehmen außerhalb internationaler Konzernstrukturen stehe.

Der Wettbewerb zwischen den Staaten beeinflusst eben auch den Wettbewerb zwischen den Unternehmen. Doch sind der Nutzung des europäischen Wettbewerbsrechts hier Grenzen gesetzt: Nur wenn der nationale Fiskus sich nicht an sein eigenes steuerliches Regelwerk hält, liegt eine kraft Europarechts verbotene Beihilfe vor. Zu einer weiter gehenden Standardisierung der internationalen Steuerpolitik nach eigenem Gusto ist – und darauf weist das US-Finanzministerium zu Recht hin – die Europäische Kommission nicht befugt.

Weder das Phänomen des Steuerwettbewerbs noch seine politische Brisanz sind indes neu. Vor allem in den 1990er-Jahren wurde *tax competition* zu einem zentralen Schlagwort der ökonomischen und auch der juristischen Fachdiskussion. Noch vor der Jahrtausendwende erreichten die Steuerpraktiken von Steueroasen und anderen *preferential tax regimes* die Ebene der internationalen Politik. In der Europäischen Union vereinbarten die Mitgliedstaaten im Jahre 1998 einen *code of conduct*, mit dessen Hilfe eine Vielzahl von steuerlichen Vorzugsbehandlungen für ausländische Investoren oder Unternehmen eingeschränkt oder abgeschafft werden konnte.

Ebenfalls im Jahre 1998 publizierte die OECD einen einflussreichen Bericht über *harmful tax competition*, der bis heute die politische Agenda leitet. Dieser Bericht akzeptiert den gesunden Steuerwettbewerb, in dem die Staaten in gleichheitsgerechter Weise (vor allem durch Senkung der allgemeinen Steuersätze) um reale Investitionen und unternehmerische Aktivitäten konkurrieren. Und er verurteilt

den schädlichen Steuerwettbewerb, der sich unter anderem durch individuelle Vorzugsbehandlungen, Intransparenz und Abweichung von anerkannten Gewinnermittlungsregeln auszeichnet.

In den folgenden Jahren trat die Diskussion um die internationale Unternehmensbesteuerung dennoch in den Hintergrund. Den Vordergrund nahm nach der Jahrtausendwende die internationale Steuerhinterziehung ein. Nicht *tax competition*, sondern *tax evasion* ist hierfür das globale Stichwort. Ob es um den Ankauf von CDs über die Konten deutscher Spa-

---

## Die Unternehmen nutzen Freiräume, die ihnen von den Staaten angeboten werden

rer in der Schweiz, Luxemburg und Österreich geht, ob durch ein Datenleck die Hintermänner von Panama-Gesellschaften aufgedeckt werden oder ob die Vereinigten Staaten mit harten Sanktionen die Banken in aller Welt zur Offenlegung der US-Konteninhaber zwingen: In allen diesen Fällen geht es immer um eindeutig rechtswidriges Verhalten von Steuerpflichtigen, dessen Bewertung ebenso wenig ein Problem ist wie eine Aussage dazu, welchem Staat die hinterzogenen Steuern zustehen.

Auf diesem Gebiet haben in den vergangenen Jahren weltweit neue Standards Einzug gehalten: Der internationale Informationsaustausch hat eine enorme Qualität und Quantität angenommen, und schon im nächsten Jahr soll ein *common reporting standard* mehr als 100 Staaten den automatischen elektronischen Austausch von Steuerdaten ermöglichen. Mit Wettbewerb zwischen Unternehmen hat das nichts zu tun – auch wenn dies leider im politischen Raum immer wieder vermengt wird.

Das Thema der Besteuerung internationaler Unternehmen kam erst seit dem Jahr 2012 wieder auf die Agenda der hohen Politik – dann aber mit unvorhergesehener Wucht und auf mehreren Ebenen. Auf nationaler Ebene sind vor allem die Vereinigten Staaten und das Vereinigte Königreich zu nennen, wo Sonderausschüsse des Senats und des Unterhauses die



Steuerpraktiken von Großunternehmen unter großer Beteiligung der Zivilgesellschaft unter die Lupe nahmen und ans Licht der Öffentlichkeit brachten.

In Deutschland wurde dies weniger thematisiert – denn bis heute wird die relativ hohe effektive Steuerquote deutscher Großunternehmen als positives Faktum konstatiert. Auf internationaler Ebene übernahmen die G20-Mitgliedstaaten die Initiative und beauftragten die OECD in Paris, einen Bericht und einen Aktionsplan über *base erosion and profit shifting* (BEPS) zu erarbeiten, also über die durch multinationale Konzerne geplante Verminderung steuerlicher Bemessungsgrundlagen sowie über das grenzüberschreitende Verschieben von Gewinnen.

In einem intellektuellen und organisatorischen Kraftakt ohnegleichen wurde bis zum Jahresende 2015 unter dem Dach der OECD und unter Mitwirkung von Industriestaaten, Schwellenländern und

sive steuerliche Verhalten der großen Unternehmen beklagt. Das verleiht der ganzen Diskussion eine moralische Dimension, die einer sachlichen Analyse nicht selten im Weg steht. Denn es fehlt nicht nur bis heute an einer Antwort darauf, wo die Grenze zwischen akzeptabler und aggressiver Steuerplanung gezogen werden muss.

Es wird mit diesem Ansatz auch verkannt, dass die Unternehmen ohnehin keinen Freiraum nutzen können, der ihnen nicht in einem ersten Schritt von den Staaten angeboten wird. Ohne Steuerwettbewerb gibt es keine Steuerplanung – und wenn man die Steuerplanung bekämpfen will, muss man den Steuerwettbewerb in den Blick nehmen. Doch dieser lässt sich nicht einfach verbieten – vielmehr bedarf es eines Konsenses für gemeinsame Regeln, namentlich einer Abstimmung der Besteuerungshoheiten.

Das BEPS-Projekt bietet zwei Prinzipien für eine Neuorientierung: das Prinzip der Einmalbesteuerung und das Prinzip der Besteuerung nach ökonomischer Realität. Beide Ansätze lassen jedoch Unschärfen erkennen, die den Erfolg des Gesamtprojekts gefährden können. So ist das Ziel der Einmalbesteuerung von der Idee geprägt, dass Wettbewerbsverzerrungen zwischen multinationalen und lokalen Unternehmen verhindert werden, wenn gesichert ist, dass Unternehmensgewinne allesamt mindestens einmal mit einer substantziellen Steuer belegt werden. Sie sollen nicht steuerfrei in Steueroasen geparkt oder durch Ausnutzung von Regulierungsdifferenzen entlastet werden können.

Namentlich die deutsche Bundesregierung hat es zum Grundsatz ihrer internationalen Steuerpolitik erklärt, eine *double non-taxation* zu verhindern. Das Problem ist jedoch, dass bei dieser Zielsetzung offen bleibt, wer denn nun diese Einmalbesteuerung vornehmen soll. Nehmen wir die in europäischen Märkten erzielten Apple-Gewinne als Beispiel: Sollen diese in den Konsumentenstaaten besteuert werden (wo es nach allgemeinen Regeln an einer steuerlichen Präsenz fehlt)? Oder in Irland (wo die Tochtergesellschaften zwar registriert sind, aber nur ein geringes operatives Geschäft betreiben)? Oder in den Vereinigten Staaten (wo Marke und Technologie entwickelt worden, aber noch keine Gewinnauszahlungen angekommen sind)? Offensichtlich drängt sich keiner der beteiligten Staaten wirklich danach, diese Gewinne zu erfassen.

---

## Die Frage, wo Wertschöpfung stattfindet, lässt sich nicht so einfach beantworten

Entwicklungsländern aus aller Welt ein eindrucksvolles Gesamtableau aus Regeln, Mindeststandards und Verträgen erarbeitet, das die internationale Steuerpolitik auf eine neue Grundlage stellen soll. Inzwischen sitzen mehr als 100 Staaten an der Implementierung dieser Beschlüsse.

Parallel dazu hat die Europäische Kommission viele Vorschläge zur Bekämpfung aggressiver Steuerplanung vorgelegt, von denen einige inzwischen als bindende Richtlinien vom Ministerrat verabschiedet sind. Die kommenden Jahre werden zeigen, ob es gelingt, die Spielregeln zu vereinheitlichen – dafür soll insbesondere ein multilaterales Instrument sorgen, mit dessen Hilfe Tausende von Doppelbesteuerungsabkommen gleichzeitig modifiziert werden sollen.

Schaut man die BEPS-Initiative näher an, so fällt zunächst auf, dass sich die Perspektive verschoben hat: Während Ende der 1990er-Jahre klar der Regulierungswettbewerb zwischen den Steuerstaaten im Vordergrund stand, wird in jüngerer Zeit das aggres-

Nach den neueren Arbeiten der G20, der OECD und der Europäischen Kommission soll nach dem Motto „*taxation follows value creation*“ der Ort der Wertschöpfung maßgeblich für Zuordnung von Unternehmensgewinnen und Besteuerungsrechten werden. Auf diese Weise soll es namentlich gelingen, der rein steuergetriebenen Verlagerung von Gewinnen an funktionslose Gesellschaften in Steueroasen die Grundlage zu entziehen.

Das Programm liest sich überzeugend. Und doch stößt es an Grenzen. Denn die Frage, was ökonomische Realität bedeutet und wo Wertschöpfung stattfindet, lässt sich eben nicht so einfach beantworten. Wo liegt die Quelle der Milliardengewinne von Apple: In Kalifornien, wo Marken und Patente entwickelt werden? In China, wo die Hardware hergestellt wird? In Europa, wo die iPhones und iPads ihre Käufer finden? Oder eben doch in Irland, wo eine Tochtergesellschaft die Inhaberschaft an den maßgeblichen Patent- und Markenrechten hält?

Das ist keine Frage, die streng wissenschaftlich entschieden werden kann. Die Bundesrepublik Deutschland achtet als erfolgreiche Exportnation darauf, dass der Ort der Produktion den Vorrang genießen soll, während Indien als großer Importeur von Dienstleistungen seinen Zugriff auf die korrespondierenden Gewinne ausländischer Anbieter erweitern möchte. Bei globaler Betrachtung lässt sich in den vergangenen Jahren in der Tat eine stückweise Ausdehnung des Besteuerungszugriffs der Marktstaaten beobachten. Der Steuerwettbewerb unterstützt das, denn die Produktion kann auswandern, der Kundstamm jedoch nicht.

An dieser Stelle zeigt sich, dass der Versuch, die internationale Besteuerung an der wirtschaftlichen Realität auszurichten, letztlich zu noch mehr Wettbewerb führen kann: Der Wettbewerb um die künstliche Verlagerung von Gewinnen wird überlagert und ersetzt durch einen noch härteren Wettbewerb um die reale Ansiedlung von Investitionen und Aktivitäten. Dass dieser Wettbewerb nicht sein Ende finden wird, lassen jüngste politische Entwicklungen erkennen.

Kurz nach der Verkündung der Apple-Entscheidung der Kommission hat die britische Regierung wissen lassen, dass das Vereinigte Königreich sich nach dem Brexit als steuerlich freundlicher Investitionsstandort profilieren wird – ohne die Schranken des europäischen Wettbewerbsrechts. Und ob die Ver-



#### DER AUTOR

**Wolfgang Schön**, Jahrgang 1961, ist Direktor am Max-Planck-Institut für Steuerrecht und Öffentliche Finanzen in München. Zudem lehrt er als Honorarprofessor für Bürgerliches Recht, Handels-, Wirtschafts- und Steuerrecht an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Zu seinen wissenschaftlichen Schwerpunkten zählen unter anderem die Schranken staatlicher Steuersouveränität und die Wettbewerbsfaktoren Steuerrecht und Unternehmensrecht. Darüber hinaus wirkt Wolfgang Schön als Vorstandsvorsitzender der European Association of Tax Law Professors und als Vizepräsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

einigten Staaten nach dem Wahlsieg Donald Trumps den in der OECD erzielten steuerpolitischen Konsens wahren werden, bleibt abzuwarten – viele wichtige Dokumente waren schon vor den Präsidentschaftswahlen in den USA umstritten.

Die Kraft steuerlicher Koordinierung hängt eben dauerhaft davon ab, ob und in welchem Umfang die Staaten in einem globalen Konsens einen Mehrwert gegenüber einer individuellen Politikstrategie erblicken können. Die kommenden Jahre werden darauf eine Antwort geben. Der Auftrag der Steuerwissenschaft besteht darin, die Prämissen und Optionen dieser Strategien klar zu identifizieren. ◀



# Auf den Spuren deutsch-israelischer Kulturgeschichte

Max-Planck-Wissenschaftler kooperieren mit Partnern in rund 120 Ländern dieser Erde. Hier schreiben sie über persönliche Erlebnisse und Eindrücke. Die Kunsthistorikerin Anna Sophia Messner vom Kunsthistorischen Institut spürt für ihre Doktorarbeit dem Leben und Wirken deutsch-jüdischer Fotografinnen in Israel nach. Dabei ergeben sich vielfältige Begegnungen zwischen gestern und heute.

Meine Arbeit in Israel ist ein bisschen wie eine Schatzsuche. Jedes Mal, wenn ich hier bin, stoße ich auf neue Quellen. Seit dem Studium habe ich mich auf deutsch-jüdische Kunst- und Kulturgeschichte spezialisiert. Ganz besonders interessieren mich Künstler, die in den 1930er-Jahren von Deutschland nach Palästina emigriert sind. Wegen der Fülle an Material musste ich für meine Promotion das Thema eingrenzen und erforsche nun das Leben und Werk deutsch-jüdischer Fotografinnen. Wie zahlreiche andere deutsche Juden waren sie vor den Nazis geflohen. Damals gab es den Spruch: „Kommen Sie aus Deutschland oder aus Überzeugung?“ Da war durchaus etwas dran. Viele Deutsche hielten im Exil an der deutschen Sprache und Kultur fest und identifizierten sich kaum mit ihrer neuen Heimat. Einige sind später auch in andere Länder weitergezogen. Das ist mit ein Grund, weshalb die Fotografinnen in Vergessenheit gerieten.

Meine Feldforschung führt mich in Archive, Museen und Privatsammlungen. Am Anfang meiner Recherchen standen die Schwestern Gerda und Charlotte Meyer aus Berlin, die in Haifa Mitte der 1930er-Jahre ein Fotostudio eröffneten. Ihre Porträtaufnahmen wurden sehr geschätzt: Sie fotografierten berühmte Persönlichkeiten wie Arturo Toscanini, David Ben-





**Anna Sophia Messner**, 35, studierte Kunstgeschichte, jüdische Geschichte und Kultur sowie klassische Archäologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) und absolvierte Sprachstudien an der Hebräischen Universität in Jerusalem. Sie kuratierte Ausstellungen am jüdischen Museum und im Stadtarchiv München und publiziert zu jüdischen und israelischen Künstlern. Von 2012 bis 2015 war sie als wissenschaftliche Assistentin am Institut für Kunstgeschichte der LMU tätig. Seit 2015 arbeitet sie im Rahmen der Max-Planck-Forschungsgruppe „Objects in the Contact Zone – The Cross-Cultural Lives of Things“ am Kunsthistorischen Institut in Florenz an ihrer Promotion.

Gurion und Golda Meir. In den 1940er-Jahren erstellten sie Dokumentationen für die Industrie, unter anderem für die Iraq Petroleum Company, die Raffinerien in Haifa hatte. Später verließen beide das Land wieder, die eine ging nach Kanada und die andere nach England.

Seit ich mit den Recherchen begonnen habe, kommen immer neue Geschichten wie diese ans Licht. Die Fotos und Dokumente tauchen auf Dachböden und in Kellern auf, manchmal sogar auf Müllkippen. Mittlerweile habe ich hier ein Netzwerk israelischer Kollegen, die mich auf neu Entdecktes aufmerksam machen. Außerdem führe ich Gespräche mit Hinterbliebenen und Zeitzeugen, die meist darauf bestehen, sich auf Deutsch mit mir zu unterhalten. Selbst die Kinder der deutschen Auswanderer sprechen die Sprache ihrer Eltern häufig noch recht gut – auch wenn das Deutsch für heutige Ohren teilweise etwas altmodisch klingen mag; wie man eben in den 1930er-Jahren in Deutschland gesprochen hat.

Das Leben hier in Tel Aviv gleicht dem in anderen internationalen Metropolen. Es ist ein bisschen wie in einer „Bubble“, weil man hier vom israelisch-palästinensischen Konflikt meist nicht viel mitbekommt. Woanders ist er durchaus präsent. In der Jerusalemer Altstadt zum Beispiel kann es besonders an religiösen Feiertagen zu Spannungen kommen, vor allem rund um den Tempelberg. Das sieht man unter anderem an mehr Militär und Sicherheitskontrollen im Stadtbild. Die Menschen in Israel versuchen dennoch einen weitestgehend normalen Alltag zu führen.

Eine häufig gestellte Frage ist, wie man als Deutsche in Israel aufgenommen wird. Ich habe nur gute Erfahrungen gemacht. Gerade die dritte Generation, also die Leute in meinem Alter, sind sehr offen gegenüber Deutschland. Sie interessieren sich für das Land, aus dem ihre Großeltern kamen, und knüpfen gern Kontakte zu Deutschen, einige lernen sogar die deutsche Sprache. Inzwischen habe ich hier ein großes berufliches Netzwerk aufgebaut und Freunde gefunden. Auch deswegen zieht es mich immer wieder nach Israel.

# Furiöses Finale

Supernovae künden von kosmischen Katastrophen. Wenn ein massereicher Stern am Ende seines Lebens in die Energiekrise schlittert oder eine bereits gestorbene Sonne mit Materie überfüttert wird, endet das in einer Explosion unvorstellbaren Ausmaßes. Was geschieht dabei im Einzelnen? **Hans-Thomas Janka** vom **Max-Planck-Institut für Astrophysik** in Garching will es genau wissen. Er simuliert Supernovae im Computer und bringt sie in der virtuellen Welt zum Bersten – mittlerweile sogar in drei Dimensionen.

TEXT **HELMUT HORNUNG**

**24.** Februar 1987. Kurz nach Mitternacht sitzt Ian Shelton in der Dunkelkammer des Las-Campanas-Observatoriums nahe der chilenischen Stadt La Serena. Der kanadische Astronom entwickelt Bilder der Großen Magellanschen Wolke, einer Nachbargalaxie unserer Milchstraße. Als die Aufnahmen im Fixierbad immer klarer hervortreten, erkennt er auf den ersten Blick einen hellen Stern, der dort nicht hingehört. Shelton geht nach draußen in die klare Nacht, sieht zum Himmel – und entdeckt das Lichtpünktchen in der Großen Magellanschen Wolke mit bloßem Auge. Dem Wissenschaftler ist sofort klar: Er beobachtet in diesem Moment eine Supernova, die nächstgelegene seit 383 Jahren.

„Die Supernova 1987A hat ein neues Kapitel in der Forschung aufgeschlagen“, sagt Hans-Thomas Janka. Seit vie-

len Jahren beschäftigt sich der Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Astrophysik mit dem astronomischen Phänomen. Dieses ist bei näherer Betrachtung unserem Alltag keineswegs so fern, wie mancher meinen mag. Denn das Kalzium in unseren Knochen oder das Eisen im Blut stammen aus den atomaren Schmelztiegeln tief im Innern der Sterne. Während vieler Supernovae wurden diese Elemente freigesetzt und vermischt sich mit anderen zu dem Stoff, aus dem letztendlich das irdische Leben entstand. So sind wir über die heftigsten Explosionen seit dem Urknall eng mit dem Kosmos verbunden.

Der Zoo der Supernovae ist vielfältig und für den Laien verwirrend. Etwa ein Dutzend unterschiedlicher Typen haben die Astronomen klassifiziert. Aber: „Grundsätzlich unterscheiden wir zwischen thermonuklearen und Kernkollaps-Supernovae“, sagt Janka. Kriterien seien die in den Spektren – also im

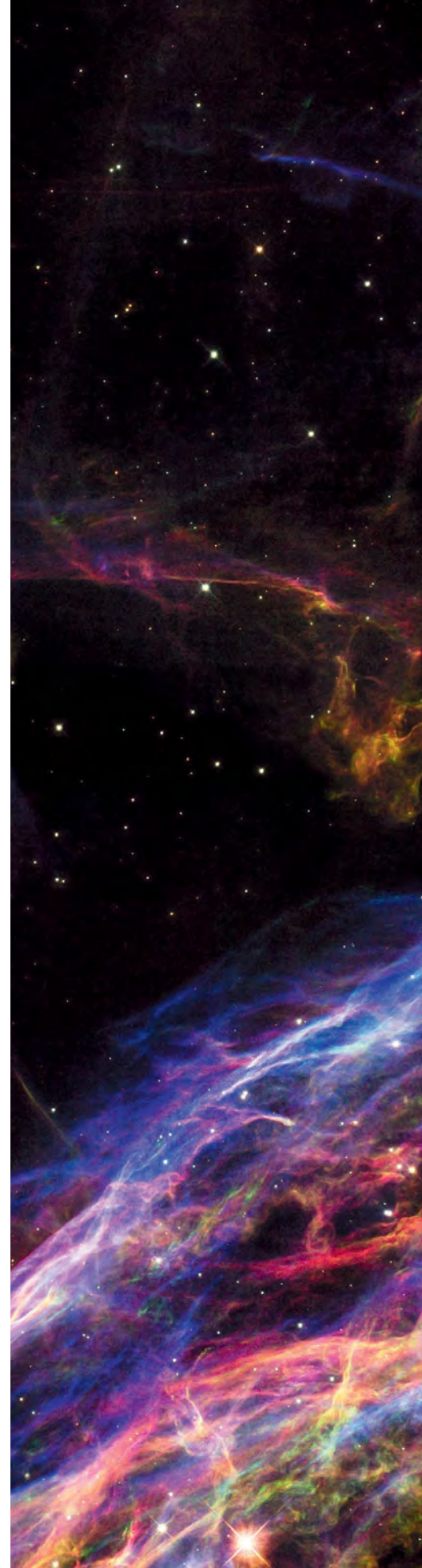




Foto: NASA/ESA/Hubble Heritage Team

Das Ende eines Sterns: Vor rund 18000 Jahren ging eine massereiche Sonne hoch. Am Ort der Katastrophe beobachten die Astronomen heute den Cirrusnebel – Gas, das einst bei der Supernova freigesetzt wurde. Das Bild zeigt einen Ausschnitt aus diesem kosmischen Gespinnst.

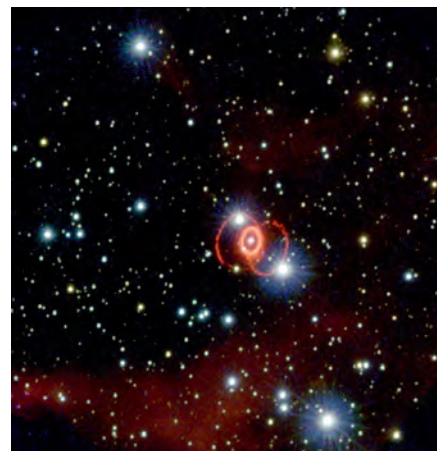


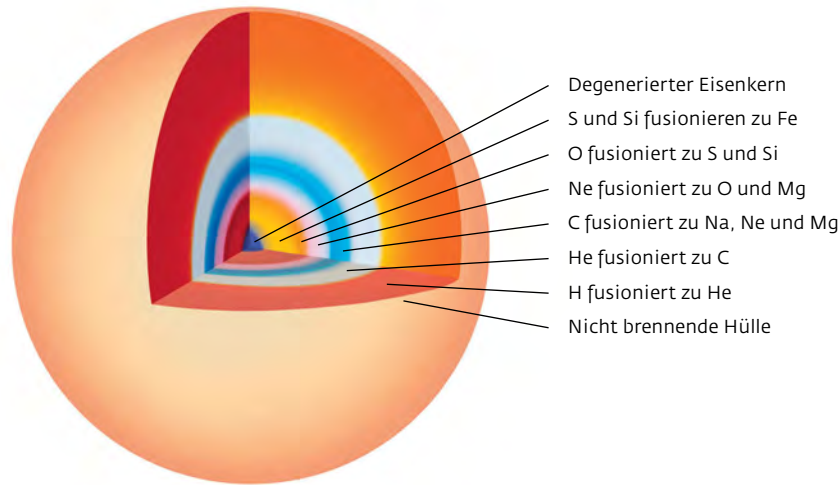
zerlegten Licht – auftretenden Linien von Wasserstoff, Helium und Silicium sowie die Form der Helligkeitskurven. So zeigen die Spektren von thermonuklearen Supernovae (Typ Ia) keine Wasserstoff- und keine Heliumlinien, aber starke Linien des Elements Silicium. Ursache der Explosion ist einem der denkbaren Szenarien zufolge die „Überfütterung“ eines weißen Zwergs, des ausgebrannten Kerns einer nicht allzu massereichen Sonne.

Gelegentlich besitzt eine solche stellare Leiche einen Partnerstern, an den sie durch Schwerkraftfesseln gebunden ist. Und die Gravitation ist es auch, die es dem weißen Zwerg ermöglicht, von der Oberfläche seines Begleiters jede Menge Gas abzuführen. Die Materie fließt auf den weißen Zwerg und sammelt sich auf ihm an. Aufgrund dieses als Akkretion bezeichneten Vorgangs legt der Zwerg ständig an Masse zu. Irgendwann erreicht er den Wert von rund 1,4 Sonnenmassen.

Wird diese nach dem Astrophysiker Subrahmanyan Chandrasekhar (1910 bis 1995) benannte Grenze überschritten, so ist der GAU programmiert: Der weiße Zwerg beginnt, sich zusammenzuziehen. Diese Kontraktion setzt gravitative Energie frei, die das Gemisch des Kristalls aus Kohlenstoff und Sauer-

Lichtspiele am Himmel: Die Supernova 1987A (Pfeil), aufgenommen kurz nach ihrem Aufleuchten als heller Stern in der Großen Magellanschen Wolke. Das kleine Bild zeigt den Überrest der Explosion gut zehn Jahre später; deutlich zu sehen sind drei helle Ringe.





Schalen voll Energie: In einer massereichen Sonne laufen unterschiedliche Brennprozesse ab. Nach der Fusion von Schwefel und Silicium zu Eisen stoppt die Produktion. Die Eisenkugel im Kern kollabiert schließlich weiter zu einem kompakten Objekt – zu einem Neutronenstern oder einem schwarzen Loch.

stoff erhitzt; denn der Stern gleicht in dieser Phase einem extrem komprimierten Diamanten. So bilden sich in seinem Innern zunächst Inseln, in denen es zu thermonuklearen Reaktionen kommt. Silicium und Nickel entstehen. Die Brandherde pflanzen sich mit Unterschallgeschwindigkeit fort (Deflagration) und brennen vom Zentrum des Sterns in Richtung seiner Oberfläche.

Dabei treten Instabilitäten auf und führen zu Turbulenzen, die mit der thermonuklearen Flamme wechselwirken und schnell deren Oberfläche vergrößern. Schließlich baut sich eine Detonationswelle auf, die mit Überschallgeschwindigkeit dahinschwappt und den Gasball förmlich zerreißt – eine Supernova geht hoch. „Leider ließ sich bisher kein einziges Vorläufersystem einer solchen Explosion direkt beobachten, weshalb wir auch noch über andere Möglichkeiten spekulieren“, sagt Hans-Thomas Janka.

Die Vertreter dieses Typs Ia machen nur rund ein Viertel aller beobachteten Supernovae aus. Der überwiegende Teil des gewaltsamen stellaren Sterbens hingegen lässt sich auf einen einzelnen massereichen Stern zurückführen (Typ II). Das heißt, dass der Vorläuferstern mindestens acht- oder neunmal schwerer ist als unsere Sonne. Zunächst fusio-

niert der Gigant für einige Millionen Jahre ruhig und unspektakulär Wasserstoff zu Helium. Ist der Vorrat an Brennstoff erschöpft, bedeutet dies aber noch lange nicht das Ende. Zwar verliert der Stern aufgrund der starken Strahlung andauernd Energie; doch kompensiert er dieses Defizit durch die Kontraktion seines inneren Bereichs – was zu einer massiven Zunahme von Druck und Temperatur führt.

### DER STERN BLÄHT SICH ZU EINEM GIGANTEN AUF

In dieser Phase vergrößert der Stern seine Oberfläche: Er bläht sich zu einem Riesen vom hundert- bis tausendfachen Sonnenradius auf. Auch seine Leuchtkraft legt beträchtlich zu, er scheint jetzt millionenmal heller als die Sonne. „Nun entscheidet sich das weitere Schicksal des Sterns“, sagt Janka. „Steigt die Temperatur im stellaren Kern genügend stark an, kann die Asche des letzten Brennprozesses zünden.“ So verbrennt Helium bei ungefähr 200 Millionen Grad Celsius zu Kohlenstoff und Sauerstoff.

Am Ende dieser Kette entwickeln Sterne mit den genannten acht oder neun Sonnenmassen in ihren Zentren Temperaturen von 800 Millionen Grad.

Der Kohlenstoff fusioniert zu Natrium, Neon und Magnesium; Neon zu Sauerstoff und Magnesium; Sauerstoff zu Schwefel und Silicium. Dem Stern wird es buchstäblich immer wärmer ums Herz. Jenseits von drei Milliarden Grad folgen die weiteren Fusionschritte zunehmend schneller aufeinander. Innerhalb von wenigen Monaten und später nur mehr einigen Tagen werden Nickel, Kobalt und schließlich Eisen geschmiedet.

Damit ist das Ende erreicht: Weil Eisen die höchste Bindungsenergie pro Kernbaustein besitzt, ließe sich aus seiner Fusion keine Energie mehr gewinnen. Der Aufbau des Sterns gleicht nun dem einer Zwiebel: Den Kern aus Eisenschlacke umgeben Schalen aus Silicium, Sauerstoff, Neon, Kohlenstoff und Helium; ganz außen sitzt die Hülle aus Wasserstoff.

Für den Fortgang der Geschichte spielt wiederum die oben erwähnte Chandrasekhar-Grenze eine Rolle, der sich der Eisenkern nun annähert. Seine Dichte ist auf 10000 Tonnen pro Kubikzentimeter gestiegen. Elektronen werden in die Protonen gequetscht und bilden Neutronen. Dadurch sinkt der Druck im Innern des Kerns, der nunmehr im Bruchteil einer Sekunde zu einem noch 10000-fach dichteren Ob-

jekt kollabiert: einem Neutronenstern. Aber es geht noch kompakter. Bei höherer Ausgangsmasse des Kerns bildet sich im Zentrum der sterbenden Sonne ein schwarzes Loch.

### DAS FRAGILE GLEICHGEWICHT IST EMPFINDLICH GESTÖRT

In jedem Fall stürzen die inneren Schichten des Sterns kontinuierlich auf das massive zentrale Objekt herab. Längst nämlich ist das diffizile hydrostatische Gleichgewicht empfindlich gestört – das Wechselspiel zwischen dem Gas- und dem Strahlungsdruck, der nach außen wirkt, und dem nach innen gerichteten Gravitationsdruck. Letzterer presst den Stern unweigerlich weiter zusammen. Der Aufprall der Materie mit Überschallgeschwindigkeit geht allerdings nicht lange gut: Eine

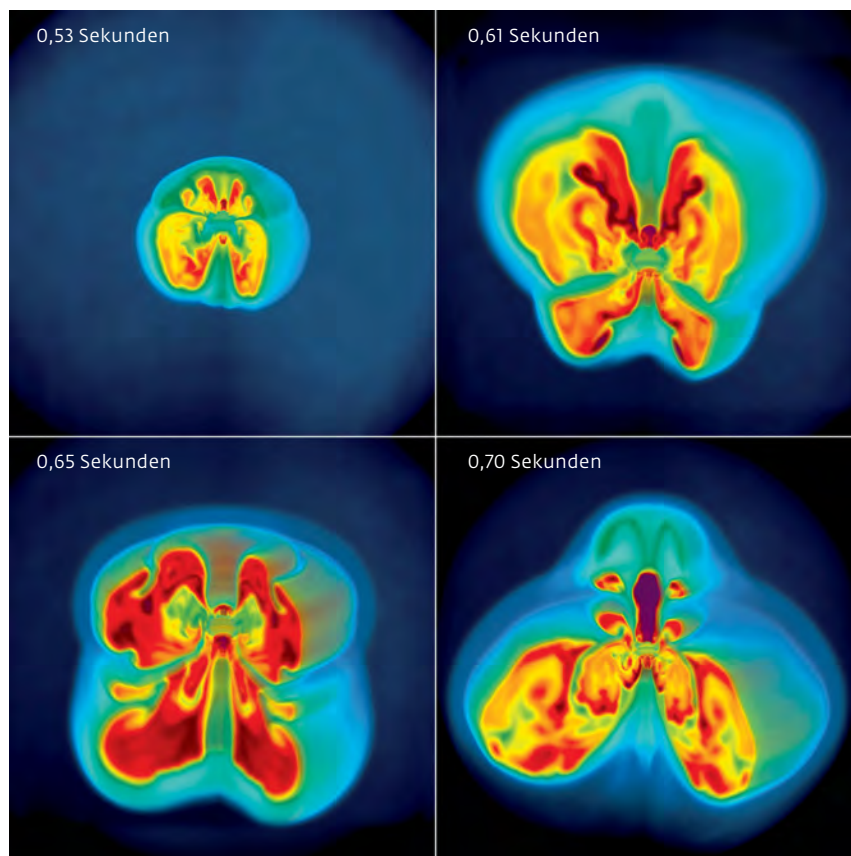
Stoßwelle läuft von innen nach außen und reißt die stellare Gashülle mit Geschwindigkeiten von mehreren 10000 Kilometern pro Sekunde auseinander – eine Supernova leuchtet auf.

Oder doch nicht? „Wenn es nur so einfach wäre“, sagt Hans-Thomas Janka. Denn als sich die Astronomen mit dem Szenario näher befassten, stellten sie fest, dass die Stoßwelle keineswegs in einem rein hydrodynamischen Rückprallmechanismus direkt die Explosion verursachen kann. „Ein solcher Stoß allein erweist sich als viel zu schwach. Er schafft es nicht, den massiven Energieverlust vom Zentrum auf dem langen Weg durch die einstürzenden Sternschichten auszugleichen“, erklärt der Max-Planck-Forscher. Kurz: „Nach nur 100 bis 200 Kilometern geht dem Stoß die Kraft aus, er bleibt im stellaren Eisenkern stecken.“

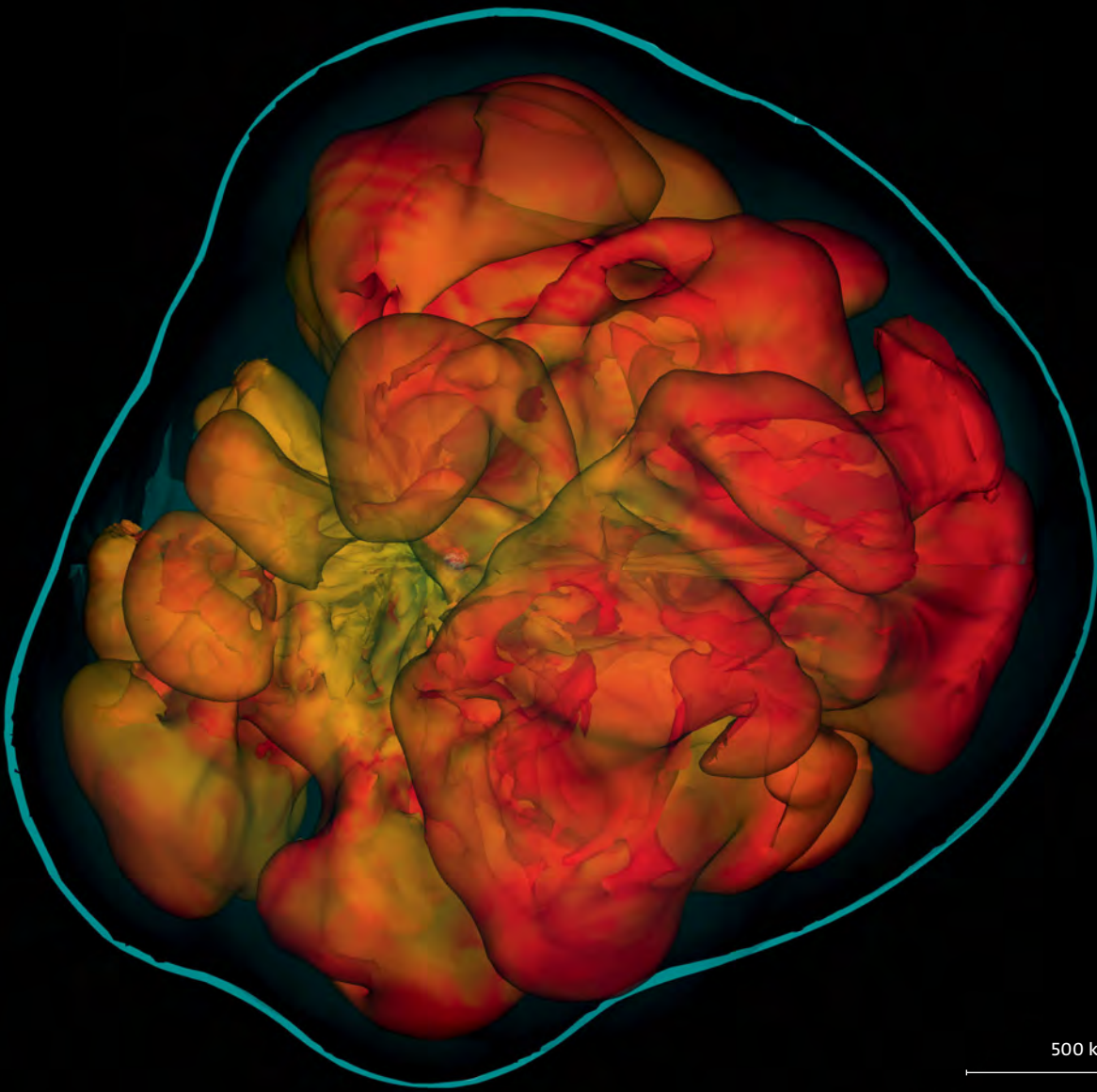
Was also wirkt als treibende Kraft? Schon Mitte der 1960er-Jahre brachten die Wissenschaftler einen Motor ins Spiel: Neutrinos. Diese nahezu masselosen Teilchen durchdringen praktisch mühelos alles Irdische, was ihnen in den Weg kommt. So auch den Nagel unseres Daumens, durch den pro Sekunde mehr als 66 Milliarden dieser flüchtigen Phantome flitzen. Dass sie auch bei Supernovae eine Rolle spielen, weiß man seit dem Ereignis vom 24. Februar 1987. Damals war der 15 bis 20 Sonnenmassen schwere Stern namens Sanduleak –69° 202 in etwa 166 000 Lichtjahren Entfernung hochgegangen. Rund drei Stunden vor dem sichtbaren Lichtblitz aus der Großen Magellanschen Wolke registrierten mehrere Neutrino-Observatorien weltweit zwei Dutzend dieser Geisterteilchen.

Obwohl alle späteren Supernovae viel zu weit entfernt waren, um derartige Neutrinos zu messen, untermauert dieser Fund doch die theoretische Annahme. „Nach einem Jahrzehnt Entwicklungsarbeit gelang es in den 1980er-Jahren, den Mechanismus des Neutrino-Transports zu beschreiben“, sagt Janka. Demnach schaffen es die Teilchen, nach einem sekundenlangen Irrweg das Sterninnere mit Lichtgeschwindigkeit zu verlassen. Und sie sind Janka zufolge in der Lage, eine immense Energie mitzuschleppen.

So wandelt sich etwa beim Kollaps zu einem Neutronenstern die Gravitationsenergie in innere Energie seiner Materie um, die wiederum Unmengen an Neutrinos erzeugt. Diese heizen das elektrisch leitende Gas (Plasma) um den Neutronenstern auf und verleihen der



Explosion im Computer: Ein Stern von 15 Sonnenmassen birst und entwickelt dabei heftige Turbulenzen. Im Zentrum existiert bereits ein Neutronenstern, die Sekundenangaben in den vier Teilbildern beziehen sich auf die Zeit nach seiner Bildung. Die Explosion verläuft asymmetrisch und wird durch die Energieübertragung von Neutrinos angetrieben. Die Durchmesser der Materieblasen (gelb, orange, rot) reichen von 300 im ersten über 600, 800 bis 1500 Kilometer im letzten Bild.



500 km

**Brodelnder Gasball:** Diese Computersimulation aus dem Jahr 2015 zeigt das Ende eines Sterns von 20 Sonnenmassen in drei Dimensionen – und damit gleichzeitig den Fortschritt in der Forschung. Denn die etwa zehn Jahre ältere Sequenz auf Seite 22 wurde noch zweidimensional gerechnet. Die äußere bläuliche Linie in diesem Bild deutet die Stoßwelle der Supernova an.

Stoßwelle dadurch neuen Schwung. Die Effizienz dieses Prozesses ist erstaunlich: „Die amerikanischen Astrophysiker Stirling Colgate und Richard White haben argumentiert, dass schon ein Prozent der Energie aus dieser Neutrinoheizung ausreicht, um eine Supernova zu zünden“, sagt Hans-Thomas Janka.

In den 1980er-Jahren gingen die Theoretiker erstmals daran, Supernovae im Computer nachzustellen – und wurden enttäuscht. Die Sterne wollten einfach nicht richtig explodieren. War die Neutrinoheizung doch ineffizient? Bald kam die Vermutung auf, dass der Misserfolg vielmehr von den verwendeten Modellen herrühren könnte, Jankas Spezialgebiet: „Die waren damals noch sphärisch-symmetrisch, also eindimensional.“ Und dann kam die Supernova

1987A. „Aus Beobachtungen lernten wir, dass bei der Explosion eine starke Asymmetrie vorhanden sein musste“, erinnert sich der Wissenschaftler.

### **GAMMALICHT WIRD NACH WENIGEN WOCHEN SICHTBAR**

Offensichtlich musste bei der Explosion eine starke Durchmischung stattgefunden haben. Das heißt: Elemente, die tief im Innern des sterbenden Sterns steckten, kamen plötzlich nach außen. So etwa Nickel, das weit in die äußerste Schale hineingeschleudert wurde und radioaktiv zu Kobalt zerfiel. „Eigentlich hätten wir erwartet, dass wir Gammaquanten, die aus dem Zerfall von Kobalt stammen, erst viele Monate nach der Explosion sehen. Sie tauch-

ten aber schon nach wenigen Wochen auf“, sagt Janka. Damit stand fest: So einfach wie die Annahme von Zwiebelschalen, die wegfliegen, ist das in der Praxis nicht.

Mit fortschreitender Rechnerleistung wurden auch die theoretischen Szenarien zunehmend komplexer: Anfang der 2000er-Jahre tüftelten Janka und seine Kollegen an zweidimensionalen Modellen, die Sterne waren darin axialsymmetrisch. Die Forscher berücksichtigten jetzt Wechselwirkungen der Neutrinos mit dem Sternplasma in hoher Genauigkeit sowie konvektive Umwälzströmungen und Turbulenzen. „Tatsächlich“, so Hans-Thomas Janka, „wird in diesen Simulationen schon zu Beginn der Explosion die Symmetrie gebrochen. Es kommt zu hydrodynamischen

schen, turbulenten Fluktuationen, ähnlich wie bei Strömungsbewegungen in der Erdatmosphäre.“

Das erste vollständige zweidimensionale Supernovamodell am Max-Planck-Institut für Astrophysik generierte Jankas damaliger Doktorand Andreas Marek in den Jahren von 2003 bis 2006. Das Institut schaffte dafür eigens einen 128-Prozessor-Rechner an und stellte ihn am benachbarten Garching Rechenzentrum auf, wo er nur für diese Simulation genutzt wurde – mit Erfolg: „Die Supernova explodierte!“, sagt Janka. Der Aufwand hatte sich gelohnt. Auch der, den Janka zusammen mit seinem Doktoranden Markus Rapp betrieb: Die Forscher schrieben die für die Computersimulationen enorm aufwendigen Programmcodes. Diese Algorithmen sollten den Neutrino-transport optimieren. Janka will nicht ins Detail gehen. Aber wenn er von „dreidimensionalen Gleichungen mit Ortskoordinate und Impulsraum“ spricht, wird auch dem Laien schnell klar, dass die Sache einigermaßen kompliziert ist.

Das gilt erst recht für dreidimensionale Simulationen, die seit wenigen Jahren zum Repertoire der Wissenschaftler zählen. Der Aufwand ist gewaltig, 16000 Prozessoren müssen für ein Modell parallel rechnen. Ein ein-

zelner, moderner Personal Computer wäre 8000 Jahre lang damit beschäftigt. Die Quintessenz laut Janka: Auch in 3-D kommt es zu Neutrino-getriebenen Explosionen. Der Astrophysiker formuliert aber noch zwei klare Ziele, die er und seine Kollegen mit den dreidimensionalen Rechnungen zukünftig anstreben: „Mit voll selbstkonsistenten Simulationen und aller relevanten Mikrophysik wollen wir den Explosionsmechanismus quantitativ für viele Sternmassen bestätigen. Und wir möchten die Modelle mit den Beobachtungen vergleichen.“

### ULTRAHELLE STRAHLER LASSEN DIE ASTRONOMEN RÄTSELN

Vielleicht lässt sich dann auch ein Rätsel lösen, das in den vergangenen Jahren zunehmend in den Vordergrund der Forschungen gerückt ist: die ultrahellen Supernovae, im Fachjargon *superluminous supernovae* genannt. Den ersten Vertreter dieses Typs beobachteten die Wissenschaftler im Jahr 2010. Obwohl sie jährlich insgesamt mehr als 1000 Sternexplosionen sichten, sind bis heute lediglich einige Dutzend dieser gigantisch hellen Strahler bekannt, die im Maximum bis zu 100-fach stärker leuchten als gewöhnliche Superno-

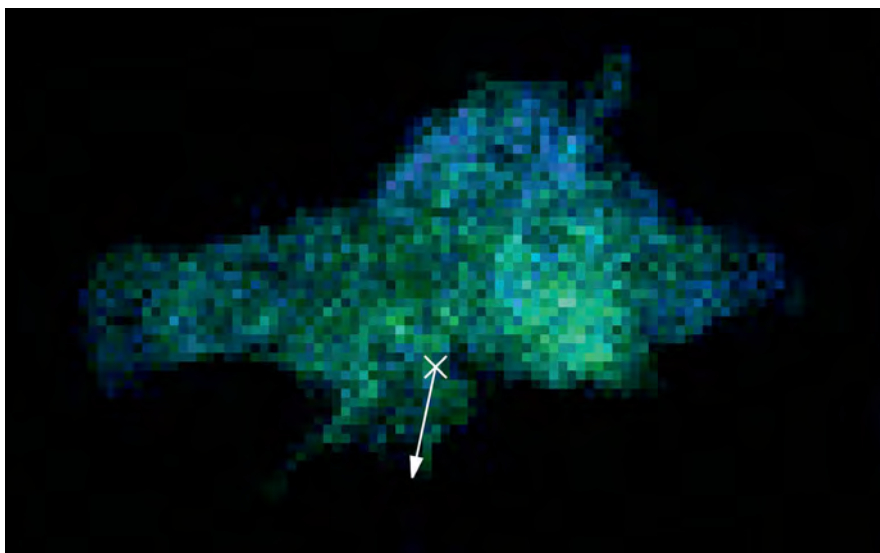
vae vom Typ II. Das Problem: „Diese Objekte sind allesamt extrem weit entfernt. Wir können nur die Lichtkurven registrieren, die Spektren hingegen sind stark verrauscht“, meint Hans-Thomas Janka.

Was verbirgt sich hinter diesen Supernovae? Die Forscher können nur spekulieren. Nach einer ersten Explosion könnte etwa ein Magnetar – ein Neutronenstern mit extrem starkem Magnetfeld (MAXPLANCKFORSCHUNG 4/2016, Seite 26 ff.) – ins Spiel kommen, diese Explosion weiter antreiben und massiv verstärken. Als zweite Möglichkeit könnte die nach außen laufende Stoßwelle der Supernova mit dichter Materie wechselwirken, die der Stern vor der Explosion abgestreift hat.

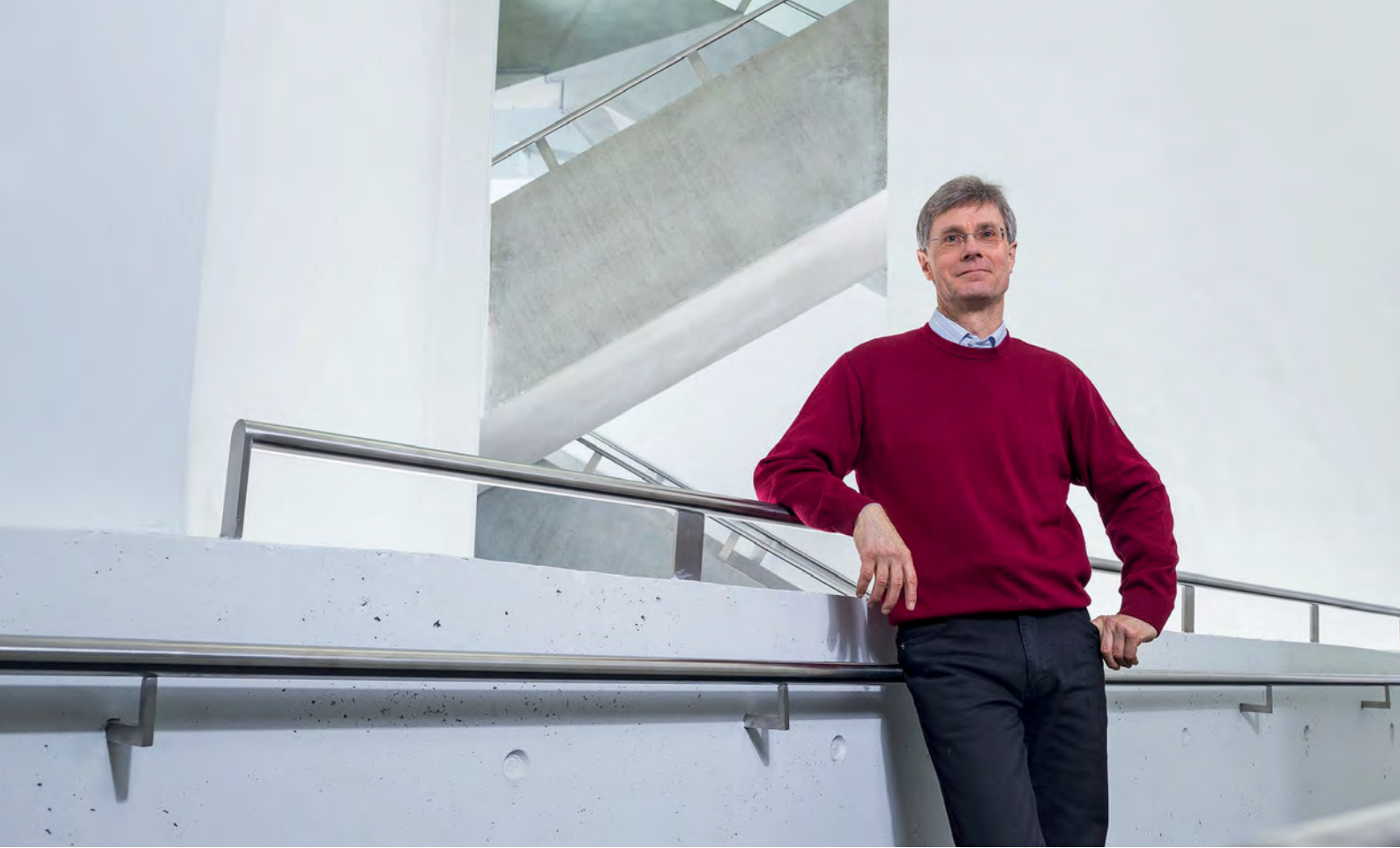
Als weitere Alternative denken die Wissenschaftler über die sogenannte Paarinstabilität nach. Dieser Theorie zugrunde liegt ein Stern mit 100 bis 300 Sonnenmassen oder sogar mehr. Ein solches Schwergewicht hat ein kurzes Leben und kollabiert bereits nach dem Erreichen des zentralen Kohlenstoffbrennens. Bei Temperaturen von einer Milliarde Grad beginnen sich spontan Lichtteilchen sehr hoher Energie in Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, zu verwandeln. Diese „Paarbildung“ führt zu einem rapiden Abfall des Strahlungsdrucks – die Gravitation gewinnt die Oberhand, das nukleare Brennen von Kohlenstoff und Sauerstoff beschleunigt sich explosionsartig, und der Stern wird zur Supernova.

Welches der drei geschilderten Szenarien zutrifft, steht noch in den Sternen. Die Astronomen wissen allerdings aus Untersuchungen der Lichtkurven, dass *superluminous supernovae*

Stellarer Kick: Durch die asymmetrische Explosion erfährt der übrig gebliebene Neutronenstern (weißes Kreuz) einen Stoß in eine bestimmte Richtung (Pfeil). Elemente wie Titan und Nickel (blau und grün) werden in jener Hemisphäre verstärkt produziert, die der Flugrichtung entgegengesetzt liegt. Diese Verteilung beobachten die Astronomen bei Supernova-Überresten im All – in perfekter Übereinstimmung mit theoretischen Modellen wie dieser Simulation.







Supernovae im Fokus: Hans-Thomas Janka beschäftigt sich am Garching Max-Planck-Institut für Astrophysik mit den größten Explosionen im Universum seit dem Urknall. Um deren Physik zu erforschen, schreibt Janka unter anderem aufwendige Computerprogramme.

anscheinend nicht in allen Fällen die unvorstellbar großen Mengen an Nickel freisetzen – etliche zehn Sonnenmassen –, die man von Paarinstabilitäts-Supernovae erwartet. Diese Tatsache muss eine brauchbare Theorie hinreichend erklären.

Um Nickel dreht sich auch Jankas jüngste Arbeit, die in diesen Tagen im *ASTROPHYSICAL JOURNAL* erschienen ist. Sie befasst sich mit dem, was sterbende Sterne hinterlassen – Supernova-Überreste. Beobachtungen und Messungen von hochenergetischer Strahlung im Röntgen- und Gammabereich mit Satellitenteleskopen wie NuSTAR und Integral zeigen, dass sich im Auswurfmaterial radioaktive Elemente, etwa <sup>44</sup>Titan oder <sup>56</sup>Nickel, nicht symmetrisch um den zurückgebliebenen Neutronenstern verteilen.

Denn die Sternleiche hat der Theorie zufolge durch die asymmetrische Explosion einen Kick in eine bestimmte Richtung bekommen – mit Folgen für die unmittelbare kosmische Umgebung: „Die Elemente sollten in jener Hemisphäre der massiv deformierten Überreste verstärkt explosiv produziert worden sein, die entgegengesetzt zur Flug-

richtung des Neutronensterns liegt“, sagt Hans-Thomas Janka. Das prognostizieren die theoretischen 3-D-Modelle. Und genau das haben die Teleskope zur Freude der Forscher in der Natur beob-

achtet: im Überrest Cassiopeia A und in der Hinterlassenschaft der Supernova 1987A. Letztere erweist sich damit 30 Jahre nach ihrem Ausbruch immer noch als Glücksfall für die Wissenschaft. ◀

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Manche Sterne enden spektakulär als Supernovae. Die ungefähr ein Dutzend unterschiedlichen beobachteten Typen lassen sich in zwei theoretische Klassen einteilen.
- Bei Supernovae vom Typ Ia explodiert vermutlich ein weißer Zwerg, der von einem Partner gefüttert wird; bei allen anderen Typen ist es ein massereicher Stern, dessen Kern kollabiert.
- Die Forscher haben herausgefunden, dass bei Kernkollaps-Supernovae der Mechanismus des Neutrino-Transports eine entscheidende Rolle für die Explosion spielt.
- Mit aufwendigen dreidimensionalen Modellen stellen Astronomen heute die physikalischen Prozesse in Supernovae nach und können einige Aspekte der Theorie durch praktische Beobachtungen überprüfen.

### GLOSSAR

**Antiteilchen:** Soweit bekannt, existiert zu jedem Teilchen ein Antiteilchen, das in Bezug auf Masse, Lebensdauer und Spin identisch ist. Entgegengesetzt gleich sind hingegen elektrische Ladung, magnetisches Moment und alle ladungsartigen Quantenzahlen. So etwa besitzt das Positron, das Antiteilchen des Elektrons, eine positive Ladung.

**Plasma:** Ein Gemisch aus neutralen und geladenen Teilchen (teilweise ionisiert) oder nur aus geladenen Teilchen wie Elektronen und Atomkernen (vollständig ionisiert), das auch als vierter Aggregatzustand bezeichnet wird. Ein Plasma tritt häufig bei hohen Temperaturen auf. So etwa bestehen Sterne aus heißem Gas und Plasma.

# Fallen in der Raumzeit

Schwarze Löcher gehören zum festen Inventar der Science-Fiction-Literatur. Tatsächlich gibt es im Universum kaum einen extremeren Ort. Diese Massemonster verschlucken alles, was ihnen zu nahe kommt: Licht ebenso wie Gas, Staub und sogar ganze Sterne. Das klingt recht einfach. Doch die Natur von schwarzen Löchern ist vertrackt. **Maria Rodriguez**, Minerva-Gruppenleiterin am **Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik** in Golm, will das eine oder andere Rätsel der kosmischen Exoten lösen.

TEXT **FELICITAS MOKLER**

**L**ange Zeit, so schien es, existierten sie nur in den Köpfen der theoretischen Physiker – schwarze Löcher. Seit spätestens einem Jahr aber ist endgültig klar: Es gibt sie wirklich. Am 14. September 2015 versetzten Gravitationswellen die Raumzeit in den amerikanischen LIGO-Detektoren erstmals messbar in Schwingung.

Der Nachweis der von Albert Einstein (1879 bis 1955) 100 Jahre zuvor prophezeiten Kräuselungen der Raumzeit gilt zugleich als experimenteller Beweis für die physikalische Existenz schwarzer Löcher. Das erste gemessene Signal GW150914 rührte von zwei schwarzen Löchern mit jeweils 36 und 29 Sonnenmassen her, die einst in einer Art Doppelsternsystem einander umkreisten, bis sie schließlich zu einem Objekt von 62 Sonnenmassen mitein-

ander verschmolzen. Wenige Monate später registrierten die Forscher Gravitationswellen der Quelle GW151226 von einem ähnlichen System. Diese Ereignisse rüttelten gewaltig am Raumzeitgefüge. Und bestätigten auf eindrucksvolle Weise die Existenz der Massemonster. (MAXPLANCKFORSCHUNG 1/2016, Seite 78 ff.)

## EINSTEINS THEORIE LÖST DAS KLASSISCHE KONZEPT AB

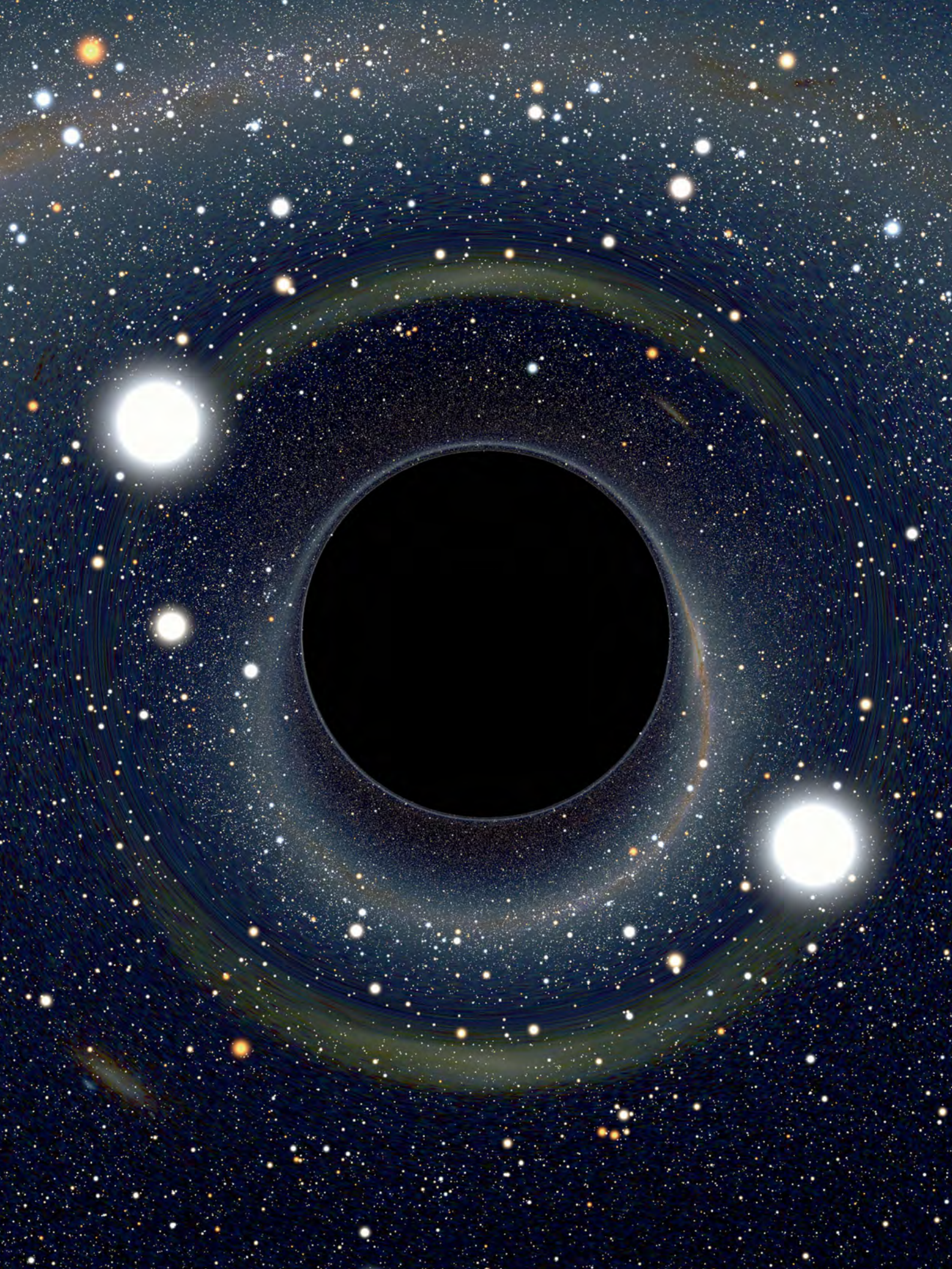
Doch schon Ende des 18. Jahrhunderts spekulierten die Naturforscher John Mitchell (1724 bis 1793) und Pierre Simon de Laplace (1749 bis 1827) über dunkle Sterne oder dunkle astrophysikalische Körper, deren Schwerkraft so stark sei, dass Licht ihnen nicht entkommen könne. Die Ideen der beiden Forscher bewegten sich noch im Rahmen der

newtonschen Gravitationstheorie und der Korpuskulartheorie des Lichts.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts revolutionierte Albert Einstein mit seiner allgemeinen Relativitätstheorie unser Verständnis der Gravitation – und damit auch jenes von Materie, Raum und Zeit. Sein Konzept löst die klassische Vorstellung von Schwerkraft als unmittelbarer Wechselwirkung zwischen zwei Massen ab, welche sich durch den starren euklidischen Raum bewegen. Vielmehr sind der dreidimensionale Raum und die Zeit zu einer vierdimensionalen Raumzeit vereint und nun selbst verformbar und dynamisch. So krümmt eine Masse wie die Sonne die Raumzeit in ihrer Umgebung – je größer und vor allem kompakter eine Masse ist, umso stärker.

Eine zweite, kleinere Masse wie ein Planet folgt in seiner Bewegung dann dieser Krümmung. Ändert sich die lo-

Im Bann der Schwerkraft: Seit mehr als einem Jahrhundert beschäftigen schwarze Löcher die Astrophysiker. Direkt beobachtet wurde noch keines, aber nicht zuletzt die Entdeckung von Gravitationswellen zeigt, dass diese bizarren Gebilde wirklich existieren.



kale Krümmung, weil eine Masse beschleunigt den Raum durchquert, so pflanzt sich diese Änderung als Gravitationswelle mit Lichtgeschwindigkeit im Raumzeitgefüge fort.

Als mathematische Basis für die dynamische Raumzeit verwendet Einstein den riemannschen Raum. Den Feldgleichungen, die darin die Raumkrümmung durch Materie und umgekehrt die Wirkung der Krümmung auf Materie beschreiben, entspringen schwarze Löcher als natürliche Lösung für auf einen Punkt konzentrierte Materie. Die Gravitation ist dort unendlich groß, die Raumzeit unendlich stark gekrümmt: mathematisch eine Singularität.

„Physikalisch besitzen derlei Unendlichkeiten jedoch keine Aussagekraft“, sagt Maria Rodriguez. „Relevant ist vielmehr jener Abstand von der Punktmasse, ab dem die Gravitation so stark wird, dass ihr nichts mehr entweichen, sondern nur noch in das schwarze Loch hineinfallen kann“, so die Leiterin einer Minerva-Gruppe am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Golm.

Weder für Materie noch für Licht gibt es also ein Entkommen. Das macht es für Astronomen so schwierig, solche Objekte zu beobachten. Die Erklärung ist einfach: Auch um einen gewöhnlichen Himmelskörper wie etwa die Erde zu verlassen, benötigen Objekte eine von dessen Masse abhängige Mindest-Bewegungsenergie. Die Geschwindigkeit, die dazu etwa für Raketen nötig ist, heißt Fluchtgeschwindigkeit. Für ein schwarzes Loch entspricht diese der Lichtgeschwindigkeit.

### DIE SCHWERKRAFT GEWINNT SCHLIESSLICH DIE OBERHAND

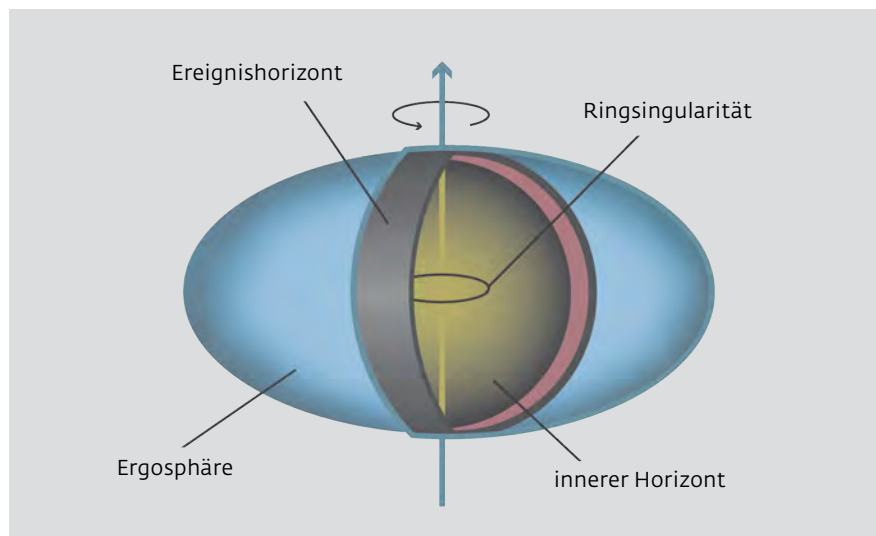
Wie sich die Raumzeit unter solchen Bedingungen verhält, beschrieb im Jahr 1916 erstmals der Astrophysiker Karl Schwarzschild (1873 bis 1916) in der nach ihm benannten Metrik. Der sogenannte Ereignishorizont, der das Innere des schwarzen Lochs von der Außenwelt abschirmt, ist durch den Schwarzschildradius definiert. Letzterer hängt von der Masse ab. „Für ge-

wöhnliche schwarze Löcher, die nicht rotieren und nicht elektrisch geladen sind, ist dieser eine perfekte Sphäre“, sagt Maria Rodriguez. Die Forscherin untersucht die Grenzflächen von schwarzen Löchern mit unterschiedlichen Eigenschaften.

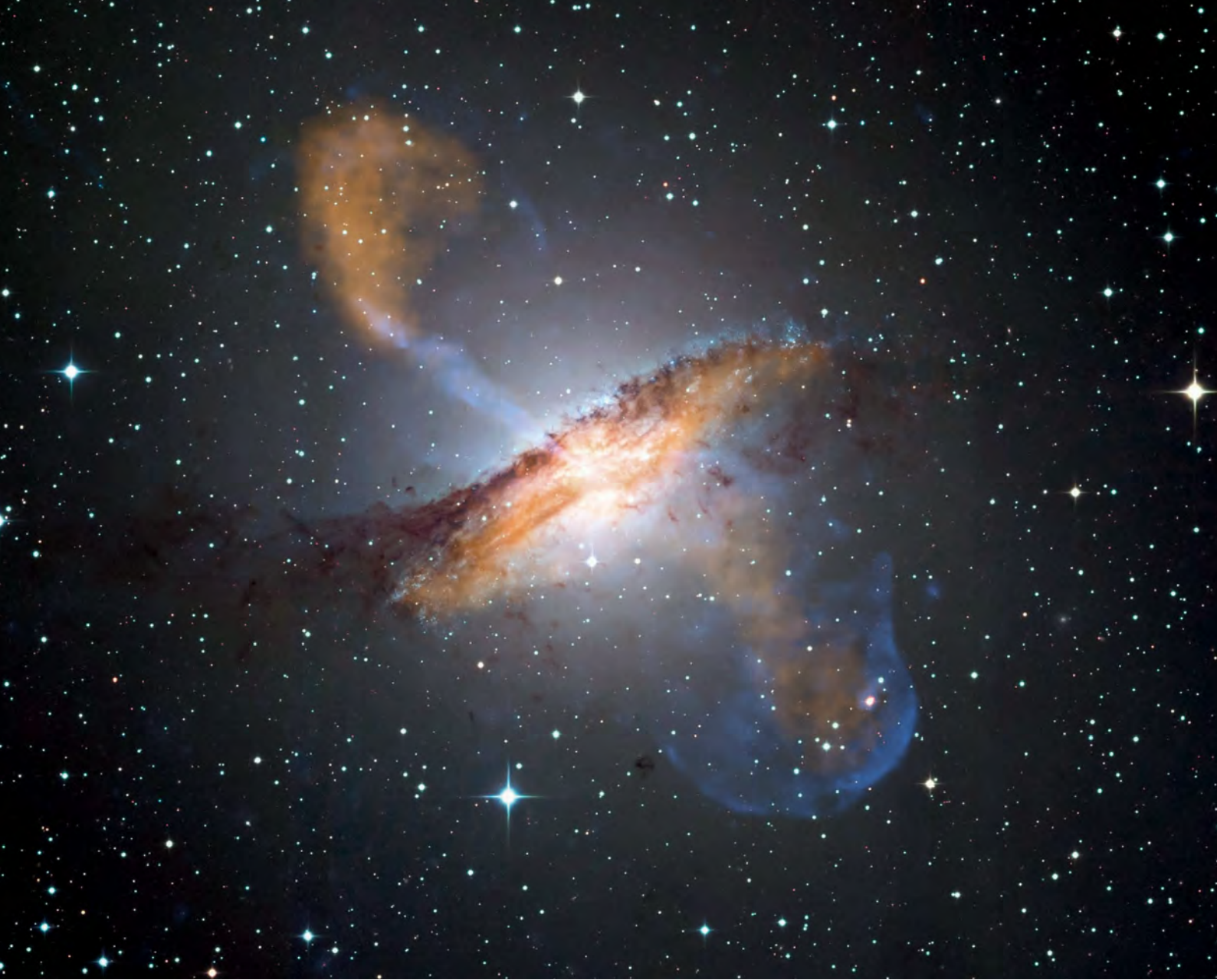
In der Natur dürften schwarze Löcher ohne Drehimpuls allerdings kaum vorkommen. Denn diese Objekte entstehen etwa, wenn besonders massereiche Sterne am Ende ihres Lebens ihren Vorrat an fusionsfähigem Material im Innern aufgebraucht haben. Dann sinkt dort die Temperatur, und thermischer und Strahlungsdruck reichen nicht mehr aus, um der Schwerkraft des Sterns entgegenzuwirken.

Das Sterninnere implodiert, dort werden die einst freien Elektronen in die positiv geladenen Atomkerne gedrückt. Die dabei freigesetzten Neutrinos transportieren bei einer solchen Supernova einen Großteil der Energie ab und schleudern die äußere Sternhülle ins All. Die Kernmaterie hingegen fällt unter der eigenen Schwerkraft immer weiter zusammen. Betrug die Anfangsmasse des Sterns mehr als acht Sonnenmassen, entsteht schließlich ein schwarzes Loch. Da Sterne gewöhnlich um die eigene Achse rotieren und der Drehimpuls erhalten bleibt, geben sie diesen an das schwarze Loch weiter.

Über die Geburt der besonders massereichen schwarzen Löcher von einigen Millionen bis zu einer Milliarde Sonnenmassen, wie sie vermutlich in den Zentren von Galaxien ruhen, rätseln die Astronomen noch. Möglicherweise formten sie sich aus der ersten Generation von extrem schweren Sternen, die – einmal zu einem schwarzen Loch geworden – rasch immer mehr Masse und damit auch mehr Drehimpuls aufgenommen haben. Es wird auch die Hypothese von sogenannten primordialen schwarzen Löchern diskutiert, wonach sich diese kosmischen Schwergewichte bereits kurz nach dem Urknall zusammen mit den ersten Galaxien gebildet haben. Auch spekulieren Astronomen



Klare Strukturen: So komplex die Physik ist, so einfach lässt sich der Aufbau erklären. Die Grafik zeigt ein rotierendes schwarzes Loch mit der Ringsingularität im Zentrum und dem inneren Horizont. Der Ereignishorizont ist so etwas wie die Oberfläche des schwarzen Lochs; was dahinter verschwindet, ist im wahrsten Sinne aus der Welt. Die Ergosphäre bezeichnet jenen Bereich, in dem jedes beliebige Objekt mitrotieren muss.



Motor im Zentrum: Centaurus A ist mit etwa 15 Millionen Lichtjahren Abstand die nächstgelegene Radiogalaxie, sendet aber auch intensive Röntgen- und Gammastrahlung aus. Die auf diesem Bild sichtbare Jetstruktur geht offenbar auf die Aktivität eines zentralen schwarzen Lochs mit ungefähr 55 Millionen Sonnenmassen zurück.

über die Existenz von mittelschweren schwarzen Löchern von 100 bis einer Million Sonnenmassen, die in den Zentren großer Kugelsternhaufen vorkommen könnten.

### TEILCHEN WERDEN HERAUSGESCHLEUDERT

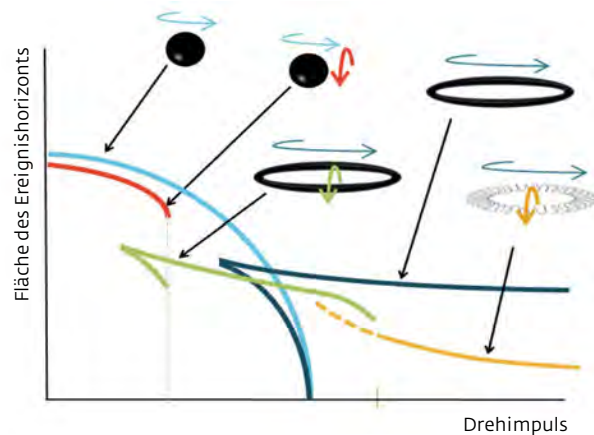
Rotiert ein schwarzes Loch, so verformt sich sein Ereignishorizont ein wenig. Vor allem aber drehen sich die Raumzeit seiner näheren Umgebung sowie die dort vorhandene Materie mit. Dieser Einflussbereich des schwarzen Lochs wird Ergosphäre genannt und hat die Form eines Ellipsoids. Materie, die einmal von außen in sie hineingeraten ist,

stürzt nicht unbedingt auf direktem Weg in die Raumzeitfalle, sondern rotiert zunächst mit dieser mit. Entkommen aber kann sie ihr dennoch nicht.

„Es sei denn, die Materie ist elektrisch geladen“, sagt Maria Rodriguez. Denn durch die mitrotierende geladene Materie bildet sich eine Magnetsphäre. Ein Teil der geladenen Teilchen wird entlang der Magnetfeldlinien abgelenkt. Je nach Vorzeichen der Ladung und Ausrichtung der Feldlinien fallen die Teilchen dann entweder schneller in das schwarze Loch hinein – oder werden entlang der Rotationsachse herausgeschleudert. „Bei rund 20 aktiven Galaxien oder Quasaren haben Astronomen inzwischen sehr

energiereiche Jets beobachtet. In deren Zentrum befindet sich sehr wahrscheinlich ein extrem massereiches, rasch rotierendes schwarzes Loch“, so die Max-Planck-Forscherin.

Um diese Phänomene richtig interpretieren zu können, versuchen die Forscher, das Verhalten rotierender schwarzer Löcher und die physikalischen Prozesse in ihrer nächsten Umgebung nach den Gesetzen der allgemeinen Relativitätstheorie zu berechnen. Analytisch ist ihnen das zunächst nur für sehr langsam rotierende schwarze Löcher gelungen. Maria Rodriguez interessiert sich aber für das Gegenstück: Objekte, die sich beinahe mit Lichtgeschwindigkeit um sich selbst drehen. >



Höhere Mathematik: Während ihrer Postdoc-Zeit am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut, AEI) hat Maria Rodriguez mögliche Flächenkonfigurationen von Ereignishorizonten schwarzer Löcher in mehr als drei Raumdimensionen berechnet. Das Diagramm zeigt analytische Lösungen für fünf Dimensionen. Ihre Formen hängen von Masse und Rotation (Drehimpuls) ab. Gezeigt sind die Projektionen der Konfigurationen von fünf auf zwei und drei Dimensionen.

Dazu löst sie die Gleichungen der Elektrodynamik und zugleich die Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie auf der Grundlage ein und desselben Formalismus. „Man kann die Lösung entweder durch Probieren finden, oder man geht systematisch vor“, sagt Rodriguez. „Wir haben eine Methodik aus der Stringtheorie angewandt.“

Diese Theorie hat ihren Ursprung in den 1960er-Jahren. Damals entdeckten die Teilchenphysiker, dass sich die Bausteine (Nukleonen) eines Atomkerns ihrerseits aus den Quarks zusammensetzen. Mit der Stringtheorie versuchten die Wissenschaftler, die starke Wechselwirkung, welche die Quarks zu Protonen und Neutronen zusammenhält, mit der schwachen und der elektromagnetischen zu vereinigen. Als geeigneter zur Beschreibung der starken Kraft erwies sich schließlich die Quantenchromodynamik.

Später griff man allerdings auf die Stringtheorie zurück, um auch noch die Gravitation mit den übrigen drei Grund-

kräften zu vereinen. Zusätzlich zu den vier Dimensionen der Raumzeit führt sie sechs weitere räumliche Dimensionen ein. „Das ist durchaus mit dem Konzept der allgemeinen Relativitätstheorie vereinbar. Denn diese schreibt die Anzahl der Raumdimensionen keineswegs vor. Die vier Dimensionen der Raumzeit bilden eine rein heuristische Grundlage“, sagt Maria Rodriguez.

### EINE AMEISE IM KABEL KENNT NUR EINE DIMENSION

Dass wir diese zusätzlichen Dimensionen – sollten sie wirklich existieren – nicht wahrnehmen, könnte daran liegen, dass diese entweder besonders winzig oder besonders groß sind. „Eine Ameise etwa, die durch ein Kabel krabbeln und ihre Welt als eindimensional erleben“, sagt Rodriguez. Als lange, dünne (biegsame) Röhre beschreiben lässt sich das Kabel allerdings nur mit zwei zusätzlichen Dimensionen.

Mit dieser Erweiterung lassen sich die unterschiedlichen Energieregimes, in denen die vier Grundkräfte wirksam sind, aber auch ihre verschiedenen Abstandsgesetze in einem Formalismus erfassen. Rodriguez' Modell zur Erzeugung von Jets bei rotierenden schwarzen Löchern ist unabhängig von Masse und Drehimpuls. Es lässt sich sowohl auf extrem massereiche kosmische Schwergewichte anwenden, wie sie vermutlich in allen Spiralgalaxien vorkommen, als auch auf ihre massearmen Gegenspieler, die bei einer Sternexplosion entstanden sind.

Den Berechnungen der Forscherin zufolge können sich die Jets in Form und Energieumsatz deutlich voneinander unterscheiden: So können sie etwa extrem stark gebündelt oder weit aufgefächert sein. „Wir müssen aber noch herausfinden, welche der Lösungen die Natur unter welchen Voraussetzungen bevorzugt“, sagt Maria Rodriguez. Darunter gebe es auch Fälle, die überhaupt keine Jets generieren.

Ein Beispiel hierfür ist etwa das Objekt im Herzen unserer Milchstraße. Seine Umgebung leuchtet im Radiolicht, energiereiche Jets lässt es jedoch vermissen. In jahrelanger Fleißarbeit haben Reinhard Genzel und seine Kollegen vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik die Orbits einzelner Sterne um die Radioquelle Sagittarius A\* im galaktischen Zentrum beobachtet.

Der Durchbruch gelang 2002, als die Astronomen mit Interferometern am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile beobachteten, wie sich der Stern S2 der Quelle Sagittarius A\* bis auf zwölf Millibogensekunden näherte. Das entspricht einer Entfernung von nur 17 Lichtstunden. Zum Vergleich: Von der Sonne bis zu Pluto braucht das Licht etwa fünf Stunden. Anhand früherer Aufnahmen haben unter anderem Genzel und seine Kollegen die extrem elliptische Umlaufbahn mit einer Dauer von 15,2 Jahren des Sterns S2 um die kompakte Radioquelle komplett rekonstruiert.

Mithilfe des 3. keplerschen Gesetzes schätzten die Forscher die Masse des zentralen Objekts auf ungefähr 3,7 Millionen Sonnenmassen. Auf ein solch enges Raumgebiet begrenzt, könnte es sich nur um ein schwarzes Loch handeln. Dank genauerer Messungen an weiteren Sternorbits gehen die Astronomen heute von etwa 4,5 Millionen Sonnenmassen aus.

Vielleicht könnten sich schwarze Löcher aber noch auf ganz andere Weise bemerkbar machen. Denn vielleicht ist die klassische Sichtweise, nach der diesen kompakten Objekten nur Informationen über sehr wenige Eigenschaften wie Masse und – gegebenenfalls – Drehimpuls und Ladung zu entlocken sind, unvollständig. Bereits Mitte der 1970er-Jahre schlug Stephen Hawking vor, dass schwarze Löcher eben doch eine bestimmte Form von Strahlung aussenden könnten, die nach ihm benannte Hawking-Strahlung. Der Theoretiker Jacob Bekenstein

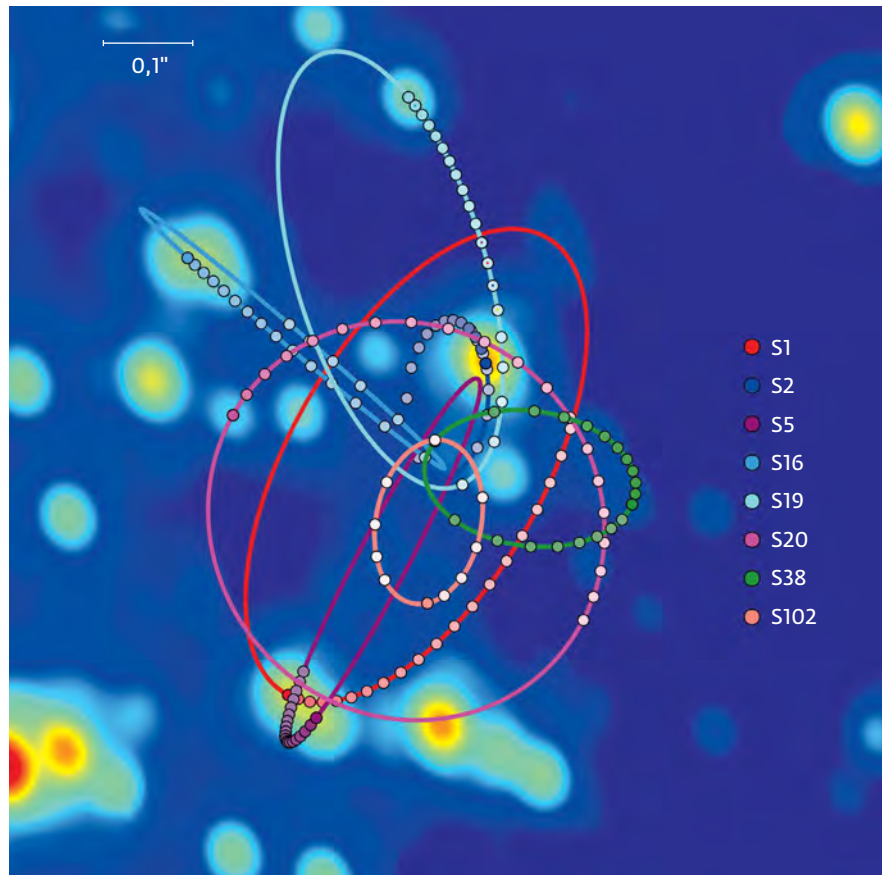
hatte kurz davor spekuliert, dass die Fläche des Ereignishorizonts ein Maß für die thermodynamische Entropie darstellen könnte.

### INFORMATION BLEIBT MÖGLICHERWEISE ERHALTEN

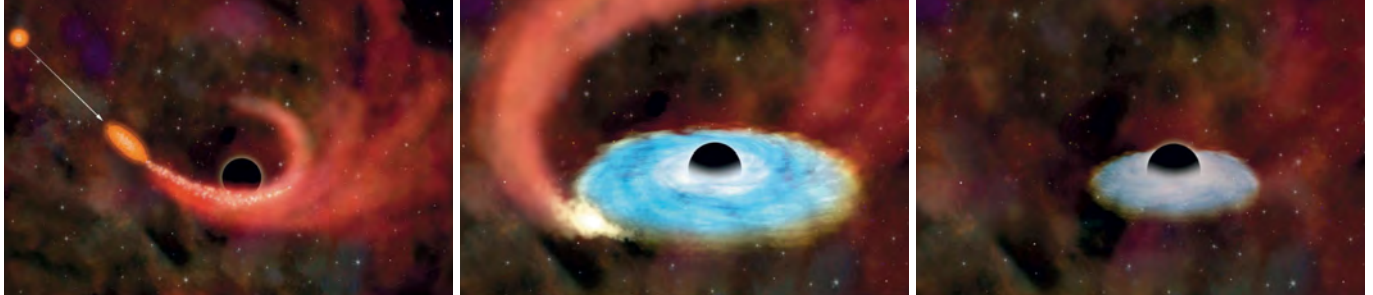
Die Entropie lässt sich als Maß für den Informationsgehalt eines Systems ansehen: Je höher die Entropie, umso mehr Information steckt in dem System. Bekenstein und Hawking berechneten erstmals die Entropie eines schwarzen Lochs. Aber diese passte gar nicht zu derjenigen des Vorläufer-

sterns, aus dem das Loch entstand. Bis heute ist nicht abschließend geklärt, was mit Entropie und Information in einem schwarzen Loch geschieht. Im Rahmen der Relativitätstheorie könnte Information im Loch vernichtet werden; dem widersprechen aber die Konzepte der Quantenphysik. Auch die Stringtheorie nimmt sich des Entropierätsels an und liefert Lösungen für einen endlichen Entropiegehalt. Damit würde die Information vom Ereignishorizont für einen außen stehenden Beobachter möglicherweise verfügbar.

In diesem Zusammenhang könnten auch frühere Arbeiten von Maria Rod-



Rund ums Zentrum: Im Herzen der Milchstraße lauert ein schwarzes Loch mit rund 4,5 Millionen Sonnenmassen. Die Gravitation des Objekts zwingt benachbarte Sterne auf mehr oder weniger elliptische Bahnen. Mit dem Keck-Teleskop auf Hawaii haben Astronomen diese Bewegungen zwischen 1995 und 2014 genau vermessen.



Drama in drei Akten: Ein Stern wird durch die Gezeitenwirkung eines schwarzen Lochs zerrissen (links). Dieses verschlingt dann einen Teil der stellaren Trümmer und heizt sich dabei stark auf (Mitte). Das wiederum führt zu einem gigantischen Strahlungsausbruch, der mit der Zeit wieder abklingt (rechts).

riguez noch einmal interessant werden, die sie bereits während ihrer Postdoc-Phase am Golmer Max-Planck-Institut in der Arbeitsgruppe von Direktor Hermann Nicolai angefertigt hat. Damals entwickelte sie auf Basis der Stringtheorie einen ganzen Katalog von Lösungen für schwarze Löcher in höheren Dimensionen. In der uns vertrauten dreidimensionalen Darstellung sehen diese aus wie eine Kugel, ein donutartiger Ring, allein stehend oder eine Kugel umlaufend, ähnlich wie der Ringplanet Saturn; oder auch wie zwei Ringe, die ineinandergreifen. In den höheren Dimensionen hängen all diese Flächen für eine Lösung zusammen.

Sollten schwarze Löcher tatsächlich eine bestimmte Art der Strahlung aussenden, dürfte es jedoch extrem schwierig werden, diese einmal zu messen. Vielleicht werden sich aber schon bald bestimmte Effekte aus Rodriguez' Modellen für klassische schwarze Löcher anhand von Beobachtungen überprüfen lassen.

Derzeit entsteht ein Verbund aus über den ganzen Erdball verteilten Radioteleskopen, das sogenannte Event Horizon Telescope. Mit ihm sowie mit dem Very Long Baseline Array wollen die Astronomen das galaktische Zentrum mit deutlich besserer Auflösung also zuvor ablichten. Zudem wollen sie das Herz der aktiven Galaxie M 87, die einen energiereichen Jet besitzt, genauer unter die Lupe nehmen. Dort ruht vermutlich ein extrem schweres schwarzes Loch von 6,6 Milliarden Son-

nenmassen. So hoffen die Forscher herauszufinden, ob Jets tatsächlich in der Ergosphäre eines schwarzen Lochs entstehen oder doch in einer Materiescheibe weiter außerhalb.

Bestimmte Effekte der Quantengravitation dürften sich hingegen auf die Gravitationswellensignale von schwarzen Löchern auswirken. Jüngste Ab-

schätzungen haben ergeben, dass die Empfindlichkeit der LIGO-Detektoren während der kürzlich angelaufenen Messkampagne hoch genug sein dürfte, um diese entweder zu bestätigen oder auszuschließen. So wird die Gravitationswellenastronomie eines Tages wohl auch die Natur der schwarzen Löcher weiter erhellen. ◀

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- In einem schwarzen Loch ist die Gravitation unendlich groß, die Raumzeit unendlich stark gekrümmt. Diese mathematische Singularität besitzt physikalisch gesehen jedoch keine Aussagekraft.
- Entscheidend ist vielmehr jener Abstand von der Punktmasse, ab dem die Gravitation so stark wird, dass ihr nichts mehr entweichen kann. Diese Grenze wird durch den Ereignishorizont markiert. Für nicht rotierende und nicht elektrisch geladene schwarze Löcher ist dieser eine perfekte Sphäre.
- In der Natur aber kommen statische schwarze Löcher kaum vor. So versuchen die Forscher, das Verhalten rotierender schwarzer Löcher und die physikalischen Prozesse in ihrer nächsten Umgebung nach den Gesetzen der allgemeinen Relativitätstheorie zu berechnen.
- Analytisch sind solche Rechnungen nur für sehr langsam rotierende schwarze Löcher geglückt. Maria Rodriguez dagegen untersucht Objekte, die sich beinahe mit Lichtgeschwindigkeit um sich selbst drehen. Dafür wendet sie die Methodik der Stringtheorie an.

### GLOSSAR

**LIGO:** Das Laser Interferometer Gravitation Wave Observatory besteht aus zwei Detektoren in den US-Bundesstaaten Louisiana und Washington. Dort wurden am 14. September 2015 erstmals Gravitationswellen entdeckt. Obwohl die in ihrer jetzigen Ausbaustufe Advanced LIGO genannte Anlage in den USA steht, hatten Max-Planck-Forscher über Hardware, Computerprogramme und Modelle einen erheblichen Anteil an dem Fund.

**Riemannscher Raum:** Ein Objekt aus dem mathematischen Teilgebiet der riemannschen Geometrie mit besonderen Eigenschaften. So etwa sind die kürzesten Strecken zwischen unterschiedlichen Punkten nicht unbedingt Geradenstücke, sondern können gekrümmte Kurven sein. Und die Winkelsumme von Dreiecken kann größer oder kleiner als 180 Grad sein.





MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

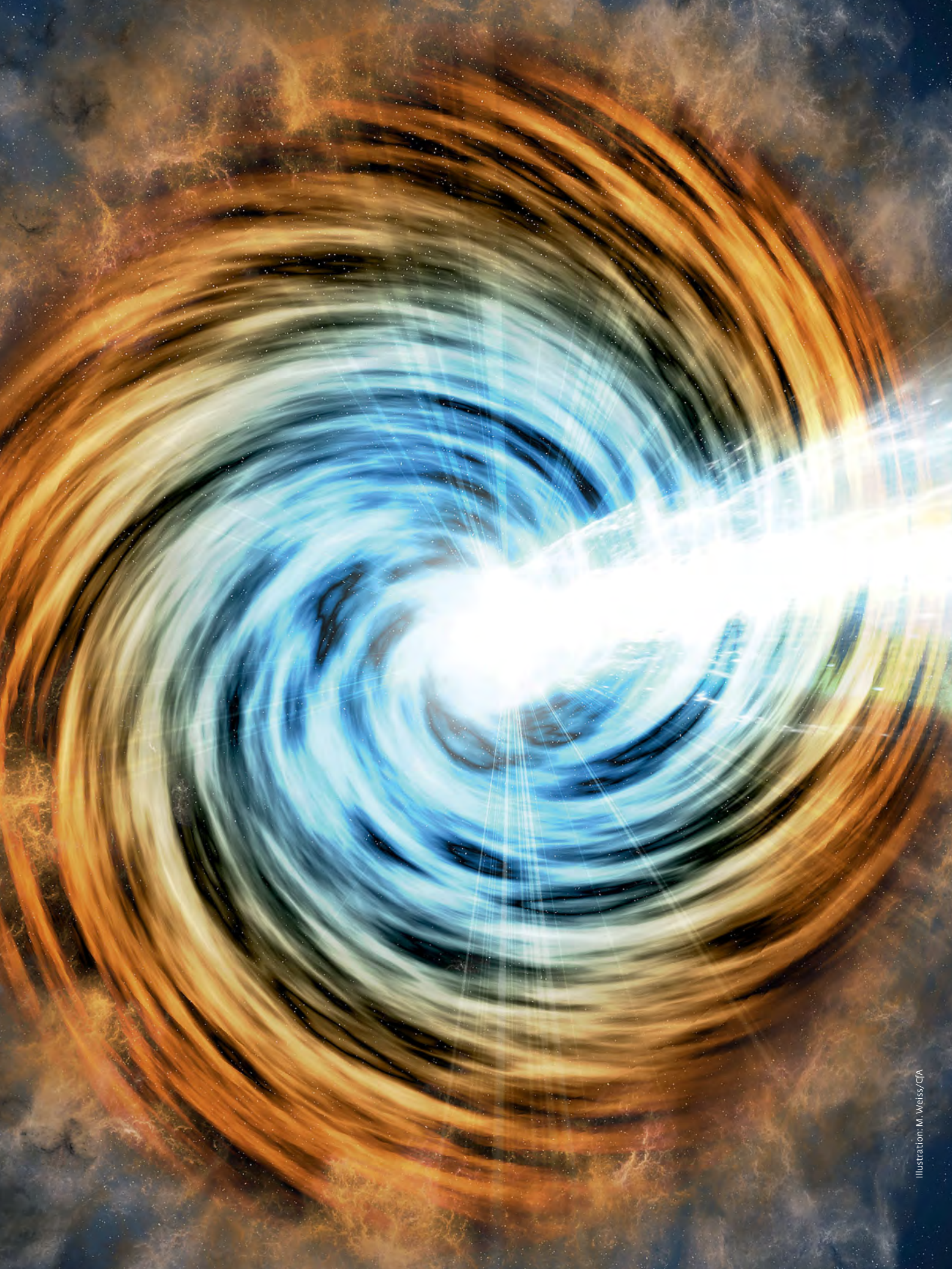


# Forschung voll abgedreht

Als DVD



oder auch auf [www.max-wissen.de/videos](http://www.max-wissen.de/videos)



# Teilchen auf Touren

Schwarze Löcher, Pulsare, Explosionswolken ehemaliger Sterne – diese Himmelskörper beschleunigen Partikel auf enorme Energien und senden hochenergetische Gammastrahlung aus. Mit den beiden Observatorien H.E.S.S. und MAGIC, die unter der Leitung der **Max-Planck-Institute für Kernphysik** in Heidelberg und für **Physik** in München entstanden sind, wird dieser extreme Spektralbereich zugänglich.

TEXT **THOMAS BÜHRKE**

**F**ragt man Werner Hofmann nach den jüngsten Entdeckungen des H.E.S.S.-Observatoriums, kommt er recht schnell auf eine kürzlich abgeschlossene Himmelsdurchmusterung zu sprechen. „Nach insgesamt 3000 Stunden Beobachtungszeit, verteilt über zehn Jahre, haben wir 77 neue Himmelskörper gefunden, die wir in diesem Energiebereich bisher nicht kannten“, sagt der Direktor am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg. Unter seiner Leitung ist das Observatorium entstanden, wofür er vielfach ausgezeichnet wurde, zuletzt mit der renommierten Stern-Gerlach-Medaille der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

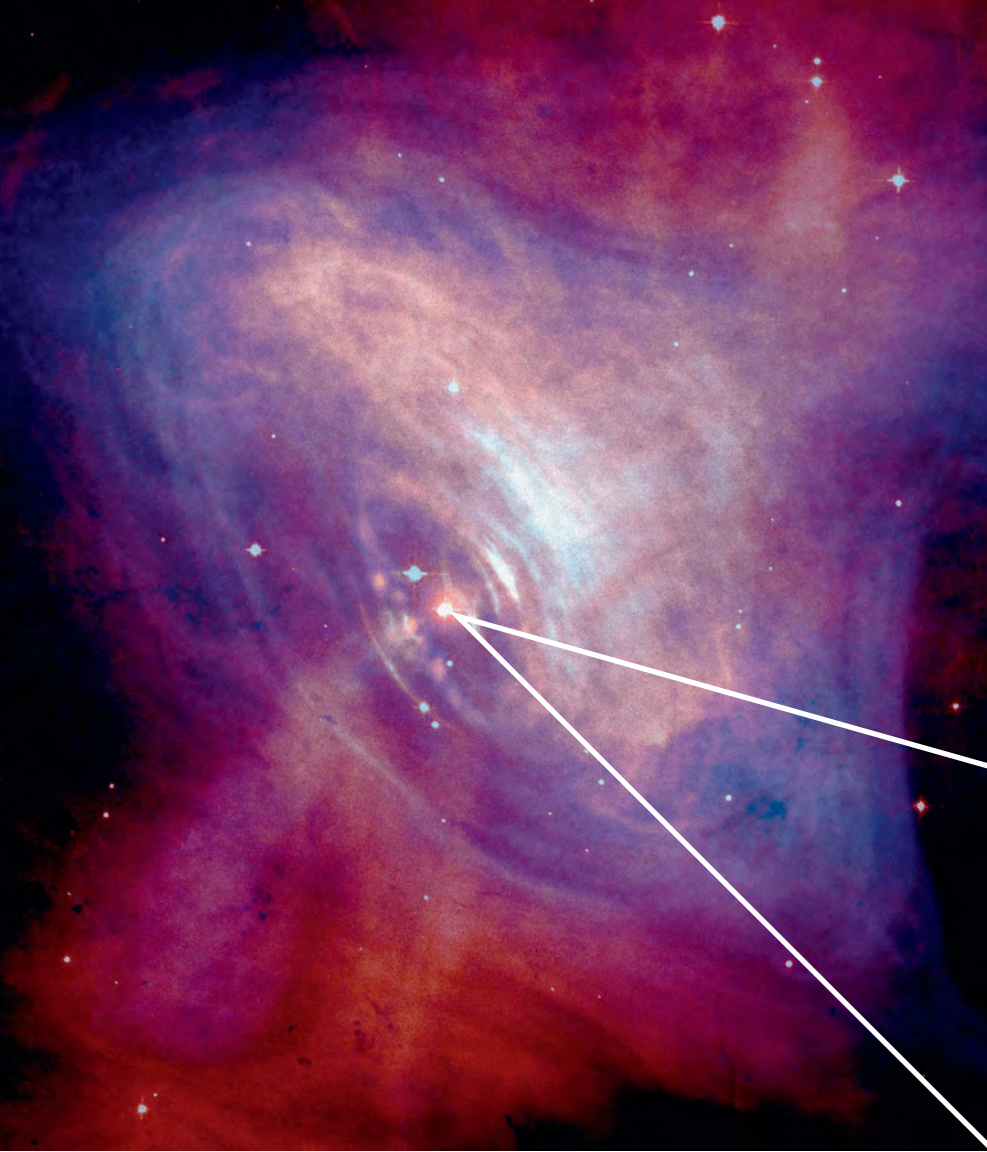
Dieser eine Satz umreißt die Schwierigkeiten, mit denen die Astrophysik mit Hochenergie-Gammastrahlen zu kämpfen hat: Man benötigt sehr viel

Zeit, um die schwache Strahlung beobachten zu können – und die größten Teleskope der Welt. Außerdem ist dafür noch ein Trick notwendig, mit dem auch H.E.S.S. arbeitet, das **High Energy Stereoscopic System**.

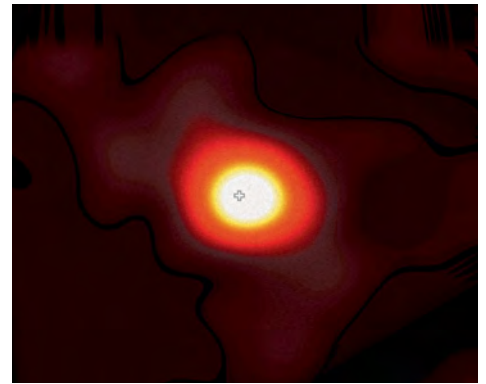
Die Gammastrahlen können die Erdatmosphäre nicht passieren, dennoch machen sie sich am Boden bemerkbar. Dringen sie in die Luft ein, kommt es nämlich zu einem fulminanten physikalischen Schlagabtausch mit den elektrischen Feldern von Atomen. Hierbei entstehen neue Teilchen, die lawinenartig in Richtung Erdboden weiterfliegen. Einzelne geladene Teilchen rasen dabei schneller als das Licht.

Das klingt erstaunlich, aber die Lichtgeschwindigkeit in der Luft ist ein klein wenig geringer als im Vakuum. So wird auch nicht Einsteins Gesetz verletzt, wonach sich kein Körper

Massemonster mit Strahlkraft: Die Galaxie PKS 1441+25 gehört zur Gruppe der Quasare. Ein schwarzes Loch im Zentrum der Galaxie zieht Materie an, wobei ein Teil davon in Form von zwei Jets nahezu mit Lichtgeschwindigkeit nach außen geschleudert wird; die Illustration zeigt einen dieser Jets.



Im Herzen des Krebsnebels: Der Überrest einer Supernova, deren Licht die Erde im Jahr 1054 erreichte, birgt einen Pulsar (kleines Bild). Hinter diesem Objekt steckt ein Neutronenstern, der sich 30-mal pro Sekunde um die eigene Achse dreht und dabei gepulste Strahlung aussendet. Die MAGIC-Teleskope registrierten Gammalicht mit einer Rekordenergie von 1,5 Billionen Elektronenvolt.



schneller als mit der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit bewegen kann. Diese Teilchen erzeugen in der Luft aber einen nur wenige milliardstel Sekunden lang dauernden Blitz, gewissermaßen einen „Überlichtknall“.

Diese sehr schwache Tscherenkow-Strahlung lässt sich mit großen Teleskopen am Boden beobachten. Die Hochenergie-Gammaastronomie verwendet also die Atmosphäre wie einen riesigen Leuchtschirm. Der Tscherenkow-Lichtfleck besitzt am Boden einen Durchmesser von 250 bis 500 Metern. Befindet sich darin ein Teleskop, so lassen sich aus der Orientierung und der Intensität des Blitzes die Herkunftsrichtung und die Energie der Gammastrahlung bestimmen.

Das im Hochland Namibias gelegene H.E.S.S.-Observatorium besteht aus vier Teleskopen mit jeweils zwölf Meter großen Sammelspiegeln sowie einem 28 Meter durchmessenden Reflektor.

Das Pendant MAGIC – **Major Atmospheric Gamma-Ray Imaging Cherenkov Telescopes** – steht auf dem 2400 Meter hohen Berg Roque de los Muchachos auf der Kanareninsel La Palma. Es verfügt über zwei Teleskope mit jeweils 17 Meter großen Sammelspiegeln.

## ZWEI OBSERVATORIEN ENTDECKEN 139 QUELLEN

„MAGIC und H.E.S.S. haben zusammen die gesamte nördliche und südliche Hemisphäre im Blick“, sagt Masahiro Teshima, Direktor am Münchner Max-Planck-Institut für Physik. Aber auch in ihren Fähigkeiten ergänzen sich die beiden Observatorien ein wenig: „Die MAGIC-Teleskope können wegen des stereoskopischen Sehens und der großen Spiegel noch Strahlung mit geringerer Energie empfangen als H.E.S.S. Dafür ist H.E.S.S. bei sehr hohen Energien empfindlicher und verfügt über größere

Detailschärfe“, sagt Teshimas Kollege David Paneque, der für die Koordination der wissenschaftlichen Arbeiten von MAGIC verantwortlich zeichnet.

Von allen bisher bekannten 178 Himmelskörpern, die hochenergetische Gammastrahlung aussenden, wurden allein 105 mit H.E.S.S. und 34 mit MAGIC entdeckt – ein Erfolg, für den H.E.S.S. 2009 unter die Top-10-Observatorien weltweit eingestuft wurde, zusammen mit dem Weltraumteleskop Hubble.

Die Gammaquellen zeugen von den heftigsten Ereignissen im Kosmos, etwa von Sternexplosionen und deren Folgen. Hat ein Stern am Ende seines Lebens seinen Brennstoff verbraucht, so setzt die Energieproduktion aus. Der Zentralbereich bricht in Sekundenbruchteilen unter der Wirkung der Schwerkraft in sich zusammen. Die äußeren Bereiche explodieren hingegen, schießen ins All hinaus und leuchten hell auf. Eine Supernova erstrahlt.

» In einem Neutronenstern ist die Materie so stark komprimiert, dass ein Teelöffel davon auf der Erde so viel wöge wie eine Million Fernverkehrszüge.

Besitzt der zusammenbrechende Kern nicht mehr als drei Sonnenmassen, so bildet sich ein Neutronenstern – eine extrem kompakte, schnell rotierende Kugel mit 20 Kilometer Durchmesser. In einem solchen Objekt ist die Materie so stark komprimiert, dass ein Teelöffel davon auf der Erde so viel wöge wie eine Million Fernverkehrszüge.

Bei diesem Kollaps wird auch das Magnetfeld des ehemaligen Sterns zusammengedrückt. Dieses Dipolfeld ähnelt in der Form dem unserer Erde mit Nord- und Südpol, ist aber milliardenfach stärker und rotiert millionenfach schneller. Nach den heutigen Vorstellungen reißen sich dabei elektrisch geladene Teilchen vom Stern los und werden entlang der Magnetfeldachse bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit in den Raum hinein beschleunigt.

Dieser Prozess produziert auf komplexe Weise Strahlung, vornehmlich in Bewegungsrichtung – wie ein Autoscheinwerfer. Dadurch erzeugt der Teilchenschwarm zwei Lichtkegel, die jeweils vom Nord- und vom Südpol des Neutronensterns in den Weltraum ragen.

In vielen Fällen ist die Magnetfeldachse gegenüber der Rotationsachse geneigt. Dadurch streichen die beiden Lichtkegel wie die Scheinwerfer eines Leuchtturms durchs All. Treffen sie auf die Erde, registrieren die Teleskope Strahlungspulse mit der Rotationsfrequenz des Körpers. In diesem Fall sprechen Astrophysiker von einem Pulsar. Diese Objekte gelten als kosmische Labore, in denen sich physikalische Vorgänge und Theorien unter Extrembedingungen testen lassen.

Im Jahr 1989 entdeckten Astrophysiker erstmals einen Himmelskörper im hochenergetischen Gammabereich. Es war der Krebsnebel – die Explosionswolke einer Supernova, deren Aufleuchten ein flandrischer Mönch im April 1054 als Erster entdeckte. Im Zentrum des auch Krabbennebel genannten Gebildes sitzt ein Pulsar, der 30-mal pro Sekunde um die eigene Achse rotiert. Der Krebsnebel lässt sich heute in allen Spektralbereichen von den Radiowellen über sichtbares Licht bis hin zu energiereichen Gammastrahlen beobachten. Er gilt als der am besten untersuchte Supernova-Überrest. Dennoch gibt er immer wieder neue Rätsel auf.

### DAS MAGNETFELD SPIELT DIE ZENTRALE ROLLE

So empfingen die Forscher von dem Objekt mit MAGIC kürzlich gepulste Gammastrahlen mit einer Rekordenergie von 1,5 Billionen Elektronenvolt oder 1,5 Teraelektronenvolt (TeV). Das ist die energiereichste gepulste Strahlung, die je an einem Stern gemessen wurde. Zum Vergleich: Sichtbares Licht besitzt eine Energie von zwei bis drei Elektronenvolt.

Für die Anfang 2016 veröffentlichten Ergebnisse musste das MAGIC-Team 320 Beobachtungsstunden aus der Zeit von Oktober 2007 bis April 2014 auswerten. „Klar ist nur, dass das sehr starke Magnetfeld des Krebspulsars die zentrale Rolle spielt“, sagt Razmik Mirzoyan, Sprecher der MAGIC-Kollaboration und Projektleiter am Münchner Max-Planck-Institut für Physik.

Um die Funktionsweise dieses kosmischen Beschleunigers aufzudecken, ist die Zusammenarbeit von Astro- und Teilchenphysikern gefragt. Sie kommen zu dem Schluss, dass in dem Magnetfeld Elektronen und ihre Antiteilchen – Positronen genannt – nahezu auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden und schließlich zerstrahlen. Doch dieser Prozess kann wohl nur Gammastrahlen mit Energien bis zu einigen Milliarden Elektronenvolt (GeV) erklären. Für die jüngst beobachteten Gammapulse muss ein anderer Mechanismus ursächlich sein.

Die Forscher vermuten derzeit, dass etwa 1500 Kilometer über der Oberfläche des Pulsars energiereiche geladene Teilchen mit Photonen der UV- und Röntgenstrahlen ein „reaktives Gemisch“ bilden, in dem die Partikel ihre Energie auf die Photonen übertragen und zu energiereichen Gammaquanten hochtransformieren. Inverser Comptoneffekt heißt dieser Prozess.

Die mit H.E.S.S. und MAGIC empfangene Gammastrahlung ist also ein Sekundäreffekt. Die eigentliche Ursache sind Teilchen, die unter extremen kosmischen Bedingungen beschleunigt werden. Da kein Umwandlungsprozess perfekt ist, gehen die Wissenschaftler davon aus, dass die primären Teilchen mehr Energie besitzen als die von ihnen erzeugte Gammastrahlung.

In der umgebenden Explosionswolke, die sich mit 1500 Kilometern pro Sekunde ausdehnt, geht es turbulent zu. Auch sie ist ein effizienter Beschleuniger. Diese heiße Gaswolke ist von Magnetfeldern durchzogen, die sich mit ihr vom

» Computersimulationen deuten darauf hin, dass die ultraschnellen Protonen einen Druck ausüben und interstellare Wolken auflösen können.

Stern fortbewegen. Dabei kommt es zu einem nuklearen Tischtennispiel: Elektrisch geladene Teilchen, vor allem Wasserstoffkerne (Protonen), werden zwischen Magnetfeldfronten hin und her geworfen und gewinnen dabei ständig an Energie – bis sie so schnell sind, dass sie diesem Pingpong entfliehen können. Dieser Vorgang funktioniert nur dann, wenn sich die Magnetfelder bewegen.

### GEFANGENSCHAFT DAUERT EINIGE JAHRHUNDERTE

„Bis vor Kurzem hatten wir erwartet, dass die Teilchen über Jahrtausende hinweg in dem Nebel gefangen bleiben, bevor sie entweichen können“, erklärt Jim Hinton, der am Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik die Abteilung „Nichtthermische Astrophysik“ leitet. „Nach unseren Messungen entkommen sie aber schon nach Jahrhunderten.“

Diese Ergebnisse sind wahrscheinlich auch für die Entwicklung der Milchstraße relevant, wie aktuelle Modelle nahelegen. Die ultraschnellen Teilchen reißen irgendwann ihren Beschleunigern aus und bilden ein in der gesamten Galaxis verteiltes Gas. „Computersimulationen deuten darauf hin, dass die ultraschnellen Protonen einen Druck ausüben und interstellare Wolken auflösen können“, erklärt Hinton. Das würde bedeuten, dass die kosmi-

schen Teilchen die Sternentstehung in einer Galaxis unterdrücken. Diese Studien stehen noch ganz am Anfang, zeigen aber, dass der Einfluss der Partikel auf die Evolution des Universums noch längst nicht verstanden ist.

Die Protonen und Elektronen schwirren überall in der Milchstraße umher und treffen dabei unter Umständen auch auf die Erde. Diese kosmische Strahlung entdeckte vor mehr als 100 Jahren der österreichische Physiker Victor Franz Hess (1883 bis 1964) auf Ballonfahrten. An ihn erinnert auch der Name der Teleskopanlage in Namibia.

Die bisher bekannten Himmelskörper erzeugen zwar kosmische Strahlung mit Energien bis zu 100 Billionen Elektronenvolt (100 TeV). Es werden aber Partikel mit sehr viel höheren Energien gemessen. Woher kommen sie?

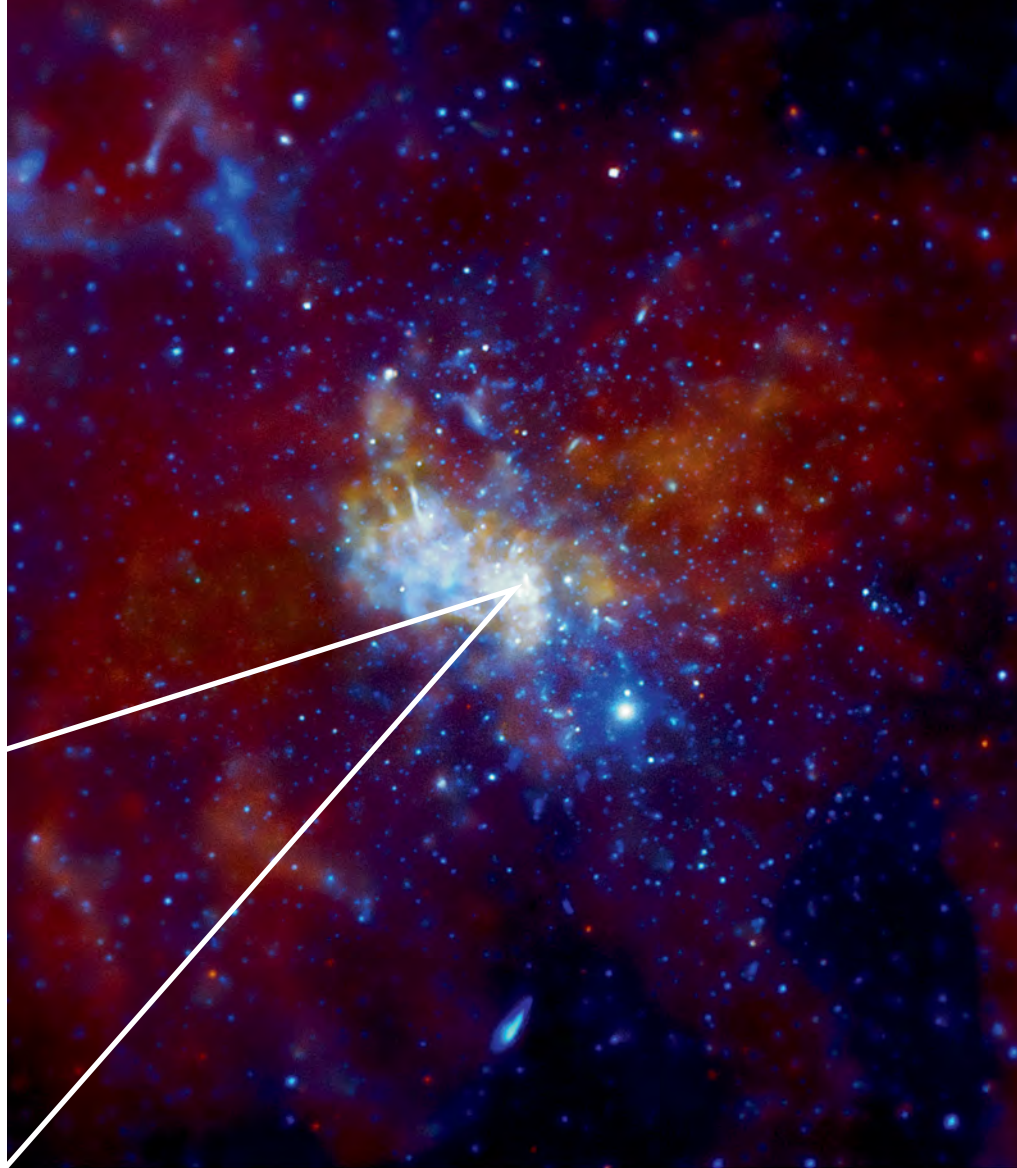
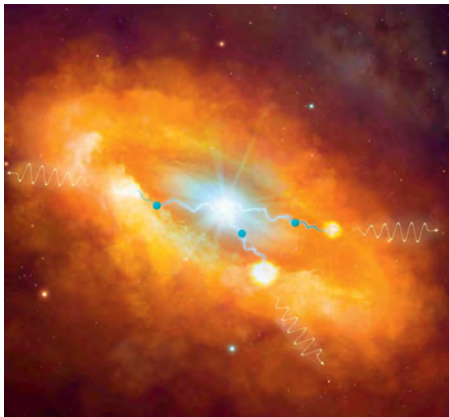
Eine Teilantwort lieferte H.E.S.S. Anfang 2016. Eine Analyse von Messdaten aus den Jahren 2004 bis 2013 bewies, dass aus dem Zentrum unserer Milchstraße Gammastrahlung mit so hoher Energie kommt, dass dort ein Beschleuniger Protonen auf bis zu 1000 Billionen Elektronenvolt (1 Petaelektronenvolt) bringt. Die Forscher

Gute Aussichten: Razmik Mirzoyan (links) und David Paneque vom Max-Planck-Institut für Physik beobachten das All mit den beiden MAGIC-Teleskopen auf La Palma. Hier stehen die Forscher auf einem Konstruktionsmodell für ein neues Gammastrahlen-Teleskop, das ebenfalls auf La Palma gebaut werden soll.



Foto: Axel Griesch

Kosmischer Beschleuniger: Im Zentrum der Milchstraße sitzt eine Quelle starker Strahlung. Die künstlerische Darstellung (kleines Bild) zeigt Prozesse, die zur Entstehung von hochenergetischem Gammalicht beitragen. Protonen (blaue Kugeln), die vom schwarzen Loch Sagittarius A\* im Zentrum beschleunigt werden, wechselwirken mit Molekülwolken der Umgebung. Dabei werden unter anderem Pionen erzeugt, die fast sofort zu Gammastrahlungsphotonen zerfallen (gelbe Wellen).



sprechen deshalb von einem Pevatron (MAXPLANCKFORSCHUNG 1/2016, Seite 42).

Nach derzeitiger Erkenntnis ist ein gigantisches schwarzes Loch Ursache dieser Strahlung. Denn viele astronomische Beobachtungen haben in den vergangenen 20 Jahren mit wachsender Genauigkeit gezeigt, dass sich unsere Milchstraße um ein schwarzes Loch dreht, das eine Masse von rund 4,5 Millionen Sonnen in sich birgt. Dieses Sagittarius A\* genannte Objekt ist von einer heißen Gasscheibe umgeben, aus der es Materie ansaugt und verschluckt.

Die H.E.S.S.-Forscher schließen aus den Daten, dass der kosmische Beschleuniger im galaktischen Zentrum über einige 10 000 Jahre hinweg kontinuierlich gearbeitet hat. Wie und wo die Teilchen genau auf Touren gebracht werden, ist indes unklar. Dies geschieht entweder in der unmittelbaren Nähe des schwarzen Lochs oder in der umgebenden Scheibe, wo ein Teil der Materie, die in Richtung des Masse-

monsters fällt, wieder herausgeschleudert und in Magnetfeldern beschleunigt wird.

Das Rätsel der energiereichsten Teilchen der kosmischen Strahlung ist damit jedoch immer noch nicht gelöst. Mit dem internationalen Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien wurden Exemplare mit bis zu 100 000 PeV nachgewiesen. Ihre Herkunft ist völlig unklar. Als Hauptkandidaten gelten Zentren von Galaxien, in denen ebenfalls schwarze Löcher sitzen, die aber erheblich massereicher und wesentlich aktiver sind als jenes in der Milchstraße.

### GRAVITATIONSFALLEN SAMMELN UNMENGEN AN GAS UND STAUB

Astronomen kennen Galaxientypen, die hierfür infrage kommen: Quasare, Radiogalaxien und Blazare. Die in ihren Zentren befindlichen supermassereichen schwarzen Löcher sind bis zu mehrere Milliarden Sonnenmassen schwer und

sammeln aus ihrer Umgebung große Mengen an Gas und Staub, mithin sogar ganze Sterne auf. Dabei wird erheblich mehr Strahlung frei, als alle Sterne in der umgebenden Galaxie aussenden – auch hochenergetische Gammastrahlung.

Sie zu empfangen ist jedoch wegen der großen Entfernungen sehr schwierig. Von den derzeit bekannten 13 entferntesten Objekten wurden acht von MAGIC, zwei von H.E.S.S., eines gemeinsam von beiden und zwei weitere mit VERITAS entdeckt, dem im US-Bundesstaat Arizona stationierten Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System mit vier 12-Meter-Teleskopen. Die Objekte sandten die empfangene Strahlung aus, als das Universum höchstens zwei Drittel seiner heutigen Größe besaß.

MAGIC hält mit dem Nachweis der beiden aktiven Galaxien PKS 1441+25 und B0218+357 den derzeitigen Entfernungsrekord. „Wir konnten diese Objekte nur deswegen aufspüren, weil wir

**Oben** Spezialist für hohe Energien: Werner Hofmann, Direktor am Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik, hat den Bau des H.E.S.S.-Observatoriums in Namibia geleitet.

**Unten** Intensive Quelle: Die 260 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie IC 310 zeigt heftige Strahlungsausbrüche. Sie hängen vermutlich mit dem Magnetfeld zusammen, das ein zentrales, supermassives schwarzes Loch umgibt. Das Inset zeigt den inneren Bereich von IC 310 in hoher Auflösung bei Radiowellen.

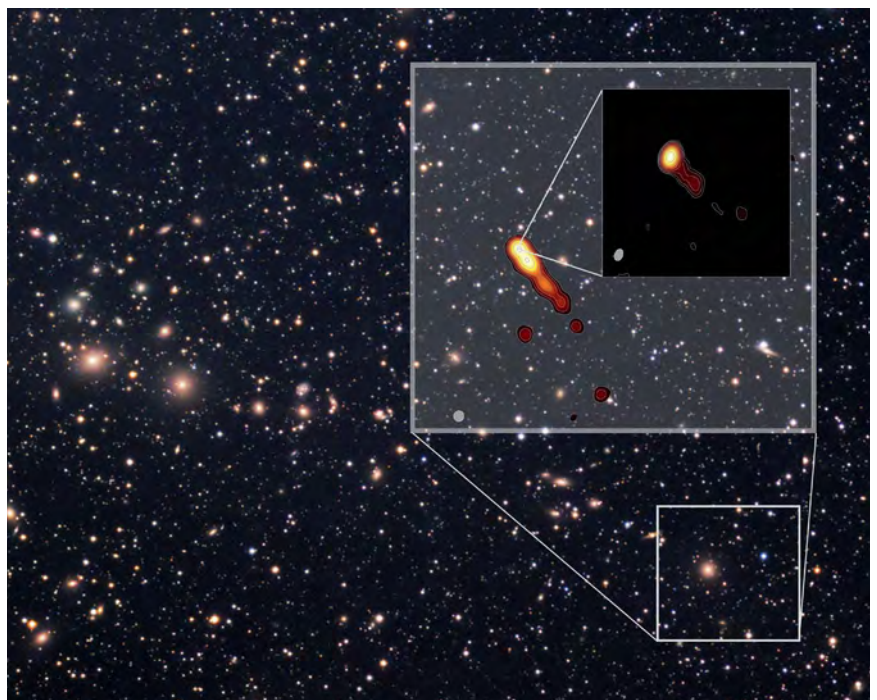
die Empfindlichkeit von MAGIC seit der Inbetriebnahme durch unterschiedliche technische Maßnahmen um das Zehnfache für Gammastrahlung niedriger Energie gesteigert haben“, sagt Max-Planck-Forscher David Paneque. „Dadurch hat sich die Beobachtungszeit für weit entfernte Quellen auf ein Hundertstel verkürzt.“

Bei PKS 1441+25 handelt es sich um einen Vertreter der sogenannten Blazare, die häufig sehr starke Strahlungsausbrüche zeigen. Eine dieser Eruptionen spürte im April 2015 das Weltraumteleskop Fermi auf. Umgehend wurde ein weltweiter Alarm an ausgewählte Observatorien ausgelöst. Und als MAGIC das Objekt ins Visier nahm, war die Gammastrahlung bis zu 100-fach stärker als normal. Diesen Ausbruch verfolgten auch andere Teleskope, etwa im sichtbaren Licht und im Röntgenbereich (MAX-PLANCKFORSCHUNG 4/2015, Seite 44).

## WIE DER BLICK IN EINEN HELLEN SCHEINWERFER

Hier kommt das besondere Merkmal von Blazaren ins Spiel. Das zentrale supermassereiche schwarze Loch zieht aus der umgebenden Gasscheibe Materie ab, wobei ein Teil davon – wahrscheinlich unter dem Einfluss von Magnetfeldern – in zwei Strahlen oder Jets umgelenkt wird, die senkrecht zur Scheibe in entgegengesetzten Richtungen ins All schießen. Bei einem Blazar ist zufällig einer dieser beiden Jets genau auf die Erde gerichtet, sodass die Astronomen mit ihren Instrumenten wie in einen hellen Scheinwerfer hineinschauen.

„Wir glauben, dass der Ausbruch weit vom schwarzen Loch entfernt in



einer kompakten Region im Innern dieses Jets stattfand“, erklärt David Paneque. Kompakt bedeutet hier: etwa so groß wie unser Planetensystem, aber nicht den gesamten Jetdurchmesser ausfüllend. „In dem Gemisch aus Teilchen und Magnetfeldern kommt es zu Turbulenzen und Schocks, in denen

die Teilchen stark beschleunigt werden und in der Folge die Strahlung erzeugen“, sagt der Forscher.

Ein weiteres Highlight ist die Beobachtung der Radiogalaxie IC 310, die sich mit 260 Millionen Lichtjahren Entfernung eher in der galaktischen Nachbarschaft befindet. Am 13. No-



» Was sich in der unmittelbaren Umgebung der schwarzen Löcher und weiter draußen in den Jets abspielt, ist noch längst nicht abschließend geklärt.

vember 2012 registrierte MAGIC Strahlungsausbrüche mit bisher unbekannter Intensität.

Überraschend an diesem Ausbruch war die Kürze von weniger als fünf Minuten. Das lässt auf die Größe der aufgeflammt Region schließen. Denn kein Objekt kann sich schneller erhehlen, als das Licht braucht, um es zu durchqueren. Die Region, aus der die Gammastrahlung kam, muss daher noch wesentlich kleiner sein als das 300 Millionen Sonnenmassen schwere schwarze Loch, dessen Durchmesser etwa 23 Lichtminuten beträgt.

„Wir vermuten, dass das schwarze Loch rasch rotiert und von einem Magnetfeld umgeben ist“, sagt Paneque. Dabei treten an den Polbereichen starke elektrische Felder auf, die Elektronen und deren Antiteilchen (Positronen) bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit beschleunigen. In Wechselwirkung mit der Umgebung erzeugen sie dann die Gammastrahlen.

Man kann sich das etwa so vorstellen wie Gewitterblitze, die sich alle paar Minuten entladen. Dabei setzt der Blitz im Kosmos Energie in einer Region wiederum von der Größe unseres Planetensystems frei. All dies geschieht sehr nahe am schwarzen Loch. „Mit diesen Beobachtungen versuchen wir, gleichsam direkt in die zentrale Maschinerie der Galaxie zu schauen“, sagt Razmik Mirzoyan.

Was sich in der unmittelbaren Umgebung der schwarzen Löcher und weiter draußen in den Jets genau abspielt, ist noch längst nicht abschließend geklärt. Weiterhin rätseln die Forscher auch über die Frage, ob aktive Galaxien jene mit dem Pierre-Auger-Observatorium nach-

gewiesenen kosmischen Strahlungsteilchen erzeugen, die mit höchsten Energien in die Erdatmosphäre hineinrasen.

**STANDORTE AUF LA PALMA UND IN DEN CHILENISCHEN ANDEN**

Die Erfolge von H.E.S.S. und MAGIC haben dazu geführt, dass ein internationales Nachfolgeprojekt beschlossen wurde: das Cherenkov Telescope Array (CTA). Dieses Observatorium wird an zwei Standorten entstehen: in den chilenischen Anden und auf La Palma,

dem derzeitigen Standort von MAGIC. Mit 19 Teleskopen auf La Palma und 99 in Chile haben die Forscher wieder den gesamten Himmel im Blick.

„Wenn alles nach Plan verläuft, können wir schon 2017 mit dem Aufbau beginnen“, sagt Masahiro Teshima. Und sein Kollege Werner Hofmann aus Heidelberg ergänzt: „Das CTA wird die erforderlichen Beobachtungszeiten im Vergleich zu H.E.S.S. oder MAGIC um das Hundertfache verkürzen.“ Gute Aussichten also für die Astroteilchen-Physik. ◀

**AUF DEN PUNKT GEBRACHT**

- Bisher kennen die Astronomen 178 Himmelskörper, die hochenergetische Gammastrahlung aussenden. Diese lässt sich mit Teleskopen wie H.E.S.S. oder MAGIC indirekt vom Boden aus beobachten.
- Zu den am besten untersuchten Objekten zählt der Krebsnebel, ein Supernova-Überrest. Von dem Pulsar in seinem Zentrum empfangen die Forscher gepulste Gammastrahlen mit einer Rekordenergie von 1,5 Billionen Elektronenvolt.
- Im Herzen der Milchstraße sitzt ein kosmischer Beschleuniger, der Protonen sogar auf Energien von bis zu 1000 Billionen Elektronenvolt (1 Petaelektronenvolt) bringt.
- Mit dem Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien wurden aus dem Kosmos sogar Teilchen mit bis zu 100 000 PeV nachgewiesen. Ihre Herkunft ist völlig unklar. Als Hauptkandidaten gelten Zentren von Galaxien mit schwarzen Löchern, die erheblich massereicher und wesentlich aktiver sind als jenes in der Milchstraße.

**GLOSSAR**

**Elektronenvolt:** Eine Energieeinheit, abgekürzt eV. Wird ein Elektron in einem elektrischen Feld beschleunigt, so ändert sich seine kinetische Energie um ein Elektronenvolt, wenn die Beschleunigungsspannung ein Volt beträgt. Im größten Beschleuniger der Erde, dem LHC, werden Protonen bis auf etwa 7 TeV ( $7 \times 10^{12}$  eV) beschleunigt. Die energiereichsten Teilchen der kosmischen Strahlung besitzen Energien von mehr als  $10^{20}$  eV. Auch die Energie von Strahlung lässt sich in der Einheit eV angeben.

**Jets:** Gebündelte Materiestrahlen, in denen Teilchen gerichtet nahezu mit Lichtgeschwindigkeit ins All fliegen. Sie entstehen etwa, wenn ein schwarzes Loch Gas aus einer rotierenden Scheibe ansammelt. Dabei stürzt nur ein Teil des Scheibengases in die Schwerkraftfalle, der andere Teil strömt senkrecht zur Rotationsebene weg – eben in Form von Jets.

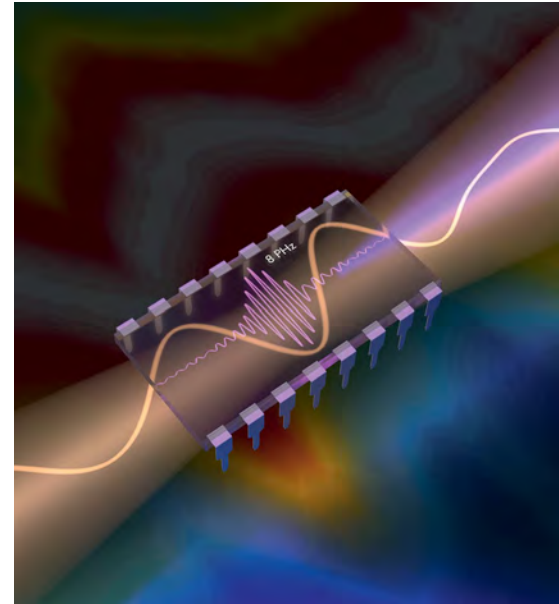
# Elektronik mit Quantenturbo

Ultrakurze Laserblitze erzeugen Strom, der eine Million Mal schneller ist als in gängigen Mikroprozessoren

Elektronische Bauteile könnten deutlich schneller arbeiten, wenn ihre Elektronen mit Licht beschleunigt würden. Forscher des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching haben Elektronen jetzt mit extrem kurzen Laserpulsen in Schwingungen mit Petahertz-Frequenz versetzt. Das ist etwa 1000-mal schneller als die Taktfrequenz moderner Mikroprozessoren. Der Strom, den die Physiker erzeugt haben, passt nicht mehr ins klassische Bild des Ladungstransports. Es handelt sich vielmehr um einen Quantenstrom, der nicht einfach vom Minus zum Pluspol einer Batterie fließt. Vielmehr schwingen die Elektronen im Quantenregime sehr schnell hin und her. Mit gewöhnlichen Spannungsquellen lässt sich dieser Zustand nicht erreichen, weil die ebenfalls schwin-

genden Atome die Elektronen aus dem Takt bringen. Die ultrakurzen Laserblitze regen die Elektronen dagegen so schnell an, dass die langsamen Atome ihnen nicht mehr in die Quere kommen können. Auf diese Weise wird der Strom eine Million Mal schneller, und die Leitfähigkeit des Materials steigt um das Zehntrillionenfache – das entspricht einer Eins mit 19 Nullen. Auch einen Nachweis für den Strom mit Quantenturbo entdeckten die Forscher: Die schwingenden Elektronen geben Licht mit ihrer Schwingungsfrequenz ab. ([www.mpg.de/10805322](http://www.mpg.de/10805322))

Laserpulse (große Sinuswelle) erzeugen elektrischen Strom, der mit Petahertz-Frequenz schwingt (kleine Sinuswelle in dem angezeigten elektronischen Bauteil). Dies lässt sich über die ausgestrahlte UV-Strahlung nachweisen.



## Unser Beitrag zur arktischen Eisschmelze

Messungen decken den Zusammenhang zwischen individuellem CO<sub>2</sub>-Ausstoß und dem Rückgang des Sommerseises auf

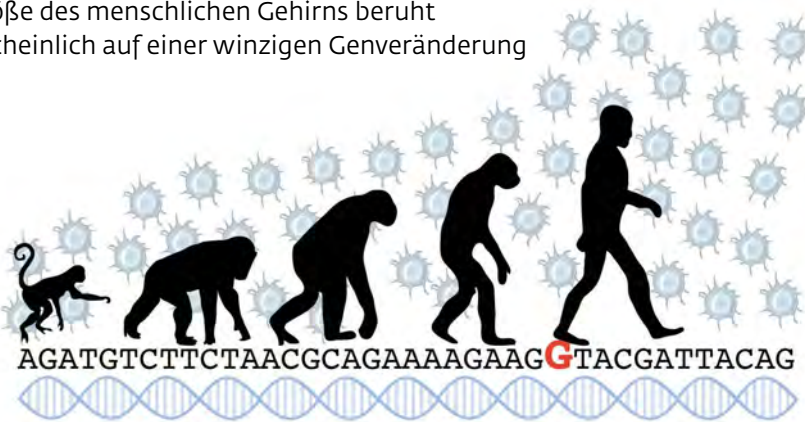


Jede Tonne Kohlendioxid, die ein Mensch auf unserer Erde freisetzt, lässt das sommerliche Meereis in der Arktis um drei Quadratmeter schwinden. Zu diesem Ergebnis gelangten Dirk Notz, Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, und Julienne Stroeve, Forscherin am US-amerikanischen National Snow and Ice Data Center, durch eine Analyse von Messdaten. In ihrer Studie fanden die Wissenschaftler außerdem heraus, dass viele Klimamodelle ein langsames Abschmelzen des Eises simulieren, als in Beobachtungen festzustellen ist, weil sie die Zunahme der Wärmestrahlung in der Arktis unterschätzen. Aus den Daten ergibt sich zudem, dass es nicht ausreicht, die Erderwärmung – wie von den jüngsten UN-Klimakonferenzen beschlossen – auf zwei Grad Celsius zu begrenzen, um das arktische Meereis auch im Sommer zu erhalten. ([www.mpg.de/10815762](http://www.mpg.de/10815762))

Teilnehmer einer Messkampagne unter anderem des Max-Planck-Instituts für Meteorologie nehmen Proben des arktischen Meerseises bei Spitzbergen.

## Buchstabendreher mit Folgen

Die Größe des menschlichen Gehirns beruht wahrscheinlich auf einer winzigen Genveränderung



Der Austausch eines einzigen Buchstabens (rot) im Code des ARHGAP11B-Gens hat zur Folge, dass sich beim modernen Menschen mehr Stammzellen im Gehirn bilden als bei Menschenaffen.

Vor rund anderthalb Millionen Jahren kam es im drei Milliarden Buchstaben langen Text des menschlichen Erbguts zu einem winzigen, aber folgenreichen Schreibfehler: Im sogenannten ARHGAP11B-Gen wurde ein C durch ein G ersetzt. Das Gen bringt Stammzellen dazu, sich zu vermehren und mehr Nervenzellen zu bilden. ARHGAP11B ist durch teilweise Verdopplung eines Vorgängergens entstanden, nachdem sich die Entwicklungslinien des Menschen und der Menschenaffen getrennt hatten. Es kommt daher nur beim Menschen vor und bei unseren nächsten, inzwischen ausgestorbenen

Verwandten, dem Denisova-Menschen und Neandertaler, nicht aber beim Schimpansen. Nach der Mutation konnte das ARHGAP11B dann sein Potenzial voll entfalten: Forschern am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik in Dresden zufolge ist der Buchstabentausch die Ursache dafür, dass beim modernen Menschen im Großhirn mehr Stammzellen entstehen. Auf diese Weise konnte das Gehirn wesentlich größer werden und seine Träger fortan zu den typisch menschlichen geistigen Leistungen wie Sprache und Denken befähigen. ([www.mpg.de/10849060](http://www.mpg.de/10849060))

## Ein Näschen für Sauerstoff

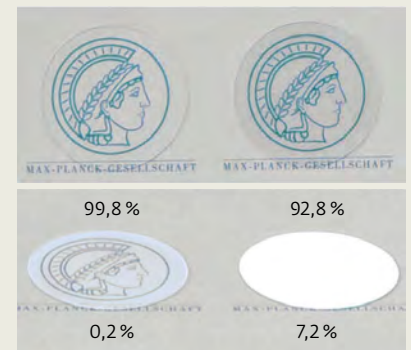
Dass Mäuse gut riechen können, erkennt man schon am Erbgut: Mehr als tausend Gene sind nur dazu da, unterschiedliche Rezeptormoleküle für die Wahrnehmung von Duftstoffen zu produzieren. Zu Letzteren zählt ein Gas, das wir Menschen eher nicht als Duft einstufen würden: Sauerstoff. Wissenschaftler der Max-Planck-Forschungsstelle für Neurogenetik in Frankfurt zufolge erschnüffeln Mäuse mit sogenannten Typ-B-Nervenzellen in der Nasenschleimhaut den Sauerstoffgehalt der Luft. Diese Zellen werden bereits aktiv, wenn die Sauerstoffkonzentration

der Luft nur leicht sinkt. Die Nager können also die Abnahme eines Dufts riechen – eine Fähigkeit, die bisher von keinem anderen Tier bekannt ist. Notwendig sind dafür die Gene Gucy1b2 und Trpc2. Diese beinhalten die Information für Moleküle, die zu Signalwegen in den Typ-B-Zellen gehören. Welcher Rezeptor den Sauerstoffgehalt registriert, ist jedoch noch unbekannt. Ob die Typ-B-Zellen aber auch beim Menschen vorkommen und auf eine Sauerstoffunterversorgung reagieren, wissen die Forscher noch nicht.

([www.mpg.de/10842129](http://www.mpg.de/10842129))

## So gut entspiegelt wie noch nie

Oberflächen lassen sich künftig deutlich wirkungsvoller entspiegeln. Forscher des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme in Stuttgart haben einen Weg gefunden, um auf Glasoberflächen Nanostrukturen zu erzeugen, die Licht fast gar nicht reflektieren und beinahe vollständig durchlassen. Sie haben eine Methode so weiterentwickelt, dass sie auf der Oberfläche kegelförmige Säulen mit einer Höhe von zwei Mikrometern erzeugen können. An einer Oberfläche, die mit solchen Säulen überzogen ist, ändert sich der Brechungsindex kontinuierlich. Daher kann der größte Teil des sichtbaren und des kurzwelligen infraroten Lichts die Oberfläche durchdringen, und zwar über eine relativ große Spanne möglicher Einfallswinkel. Herkömmliche Antireflexschichten oder kürzere Nanostrukturen entspiegeln eine Oberfläche nur in einem schmalen Bereich des optischen Spektrums und wirken auch nur bei stark eingegrenzten Einfallswinkeln. Die neue Entspiegelung könnte in Hochleistungslasern, Kameras und Mikroskopen, aber auch in Touchscreens oder Solarmodulen eingesetzt werden. ([www.mpg.de/10789612](http://www.mpg.de/10789612))

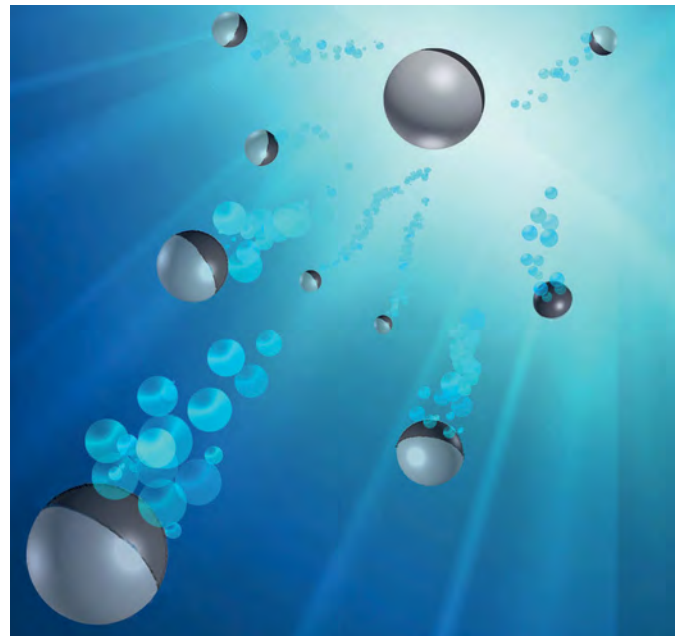


Ein Glasplättchen, auf dessen Oberfläche Nanosäulen freigeätzt wurden (linke Abbildungen), reflektiert bei einem Einfallswinkel von 30 Grad nur 0,2 Prozent des Lichts und ist für 99,8 Prozent durchlässig. Ein Plättchen ohne diese Nanostruktur (rechte Abbildungen) erreicht bei diesem Einfallswinkel lediglich eine Transmission von 92,8 Prozent und reflektiert 7,2 Prozent.

# Vom Licht geleitet

Mikroschwimmer lassen sich gezielt bewegen

Winzige Schwimmkörper ahmen jetzt eine Fähigkeit vieler Mikroorganismen nach. Je nach Bedarf können sie sich nämlich in Wasser mit einer gelösten organischen Substanz zu einer Lichtquelle hin oder von ihr weg bewegen. Um Mikroschwimmern zu dieser Phototaxis zu verhelfen, haben Forscher des Stuttgarter Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme und der Universität Stuttgart Mikrokügelchen aus Glas halbseitig mit Kohlenstoff beschichtet. Im Licht wärmen sich die Kohlenstoffschicht und die sie umgebende Flüssigkeit auf, sodass sich das Wasser und die organische Substanz teilweise entmischen. Auf diese Weise entsteht zwischen der unbeschichteten und der kohlenstoffbeschichteten Seite des Kügelchens ein Gefälle in der Konzentration des gelösten Stoffs. Um den Konzentrationsunterschied auszugleichen, strömt Wasser von der einen auf die andere Seite des Mikroschwimmers und treibt diesen von der Lichtquelle weg. Der Orientierungsmechanismus ermöglicht es, Mikroschwimmer mit einer Lichtquelle gezielt durch Flüssigkeiten zu steuern. ([www.mpg.de/10757305](http://www.mpg.de/10757305))



Zur dunklen Seite: Halbseitig mit Kohlenstoff beschichtete Glaskügelchen navigieren selbstständig von einer Lichtquelle weg.

# Affen mit Sprachgefühl

Die Tiere verarbeiten komplexe Silbensequenzen ähnlich wie Babys

Schon Babys besitzen einen Sinn für Grammatik: Säuglinge erkennen bereits im Alter von drei Monaten, nach

welchen Regeln Silben kombiniert werden, und merken, wenn eine Regel verletzt wird. Wissenschaftler des Leipzi-

ger Max-Planck-Instituts für Kognitions- und Neurowissenschaften haben nun herausgefunden, dass auch Affen zumindest Vorläufer dieser Fähigkeit besitzen. Die Forscher haben die elektrische Hirnaktivität auf der Kopfoberfläche von Makaken gemessen, während die Tiere bedeutungslose, aber Regeln folgende Silbensequenzen hörten. Dabei stellten sie fest, dass das Gehirn der Tiere in ähnlicher Weise elektrisch aktiv ist wie das von drei Monate alten Babys. Zudem konnten sie an den Gehirnreaktionen der Makaken ablesen, dass die Tiere eine falsche Silbenfolge bemerkten. Diese Fähigkeit muss folglich entstanden sein, ehe sich die zum Menschen führende Entwicklungslinie von den übrigen Primaten getrennt hat. Erwachsene Menschen büßen die Fähigkeit allerdings wieder ein: Sie erkennen sprachliche Muster nicht wie Säuglinge oder Makaken durch bloßes Zuhören, sie müssen vielmehr aktiv nach den Regeln suchen.

([www.mpg.de/10821435](http://www.mpg.de/10821435))

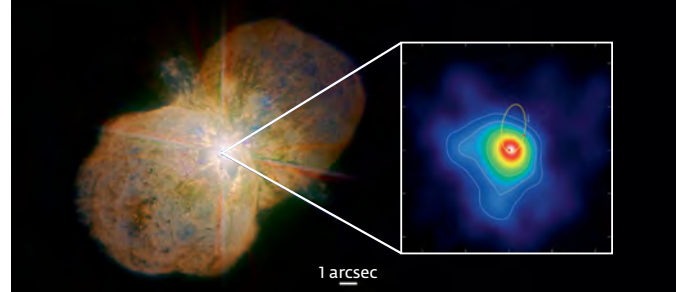
In vielen Sprachen folgen die Silben bestimmten Regeln. Im Deutschen beispielsweise folgt auf die Anfangsilben „er“ und „sie“ mit mehr oder weniger Abstand oftmals ein „t“ am Ende. Die Silbe „ich“ wird dagegen von einem „e“ am Ende, „du“ von einem „st“ begleitet. Auch Makaken und drei Monate alte Säuglinge erkennen diese Regeln, die Affen lernen sie jedoch langsamer als Menschen.

Er lacht.  
Ich lache.  
Sie singt.  
Du singst.

# Das turbulente Herz von Eta Carinae

Detailreiche Bilder des Doppelsystems zeigen die Kollisionszone des Sternwinds

Eta Carinae ist ein sehr massereiches und hell leuchtendes Doppelsternsystem. Der schwerere Partner zählt mit rund 100 Sonnenmassen zu den größten und leuchtkräftigsten Sternen überhaupt. Ein Team unter der Leitung von Gerd Weigelt vom Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie hat nun zum ersten Mal Eta Carinae mittels der Nahinfrarot-Interferometrie untersucht. Dabei gewannen die Forscher Bilder des Bereichs zwischen beiden Sternen, in dem die jeweiligen Sternwinde mit Geschwindigkeiten von mehr als zehn Millionen Kilometern pro Stunde kollidieren. Im Kollisionsgebiet steigt die Temperatur auf viele zehn Millionen Grad – heiß genug, um Röntgenstrahlung zu erzeugen. Bis jetzt war es nicht möglich, diese winzig erscheinende zentrale Region räumlich aufzulösen. Die Astronomen nutzten eine neue Bildverarbeitungstechnik, die sie am Instrument AMBER des Very Large Telescope Interferometer (VLT) der Europäischen Südsternwarte einsetzten. ([www.mpg.de/10792651](http://www.mpg.de/10792651))



Sturm im All: Das linke Bild zeigt den Homunculus-Nebel um das massereiche Doppelsternsystem Eta Carinae. Rechts eine hochaufgelöste Aufnahme der Windkollisionszone im Zentralbereich des Systems. Dieses Gebiet ist rund 100-fach größer als der Durchmesser eines jeden der beiden Sterne. Die gelbe Ellipse zeigt die Umlaufbahn des Doppelsternsystems, die zwei roten Punkte deuten auf die Positionen der beiden Sterne zum Zeitpunkt der Beobachtung hin.

## Hautstammzellen in Kultur

Neue Methode könnte die Anzahl an Tierversuchen reduzieren

Wunden müssen verheilen, ausgefallene Haare ersetzt werden. Dafür nutzt die Haut Stammzellen in den Haarfollikeln. Gelänge es, solche Stammzellen im Labor zu züchten, würde dies unter anderem manche Tierversuche über-

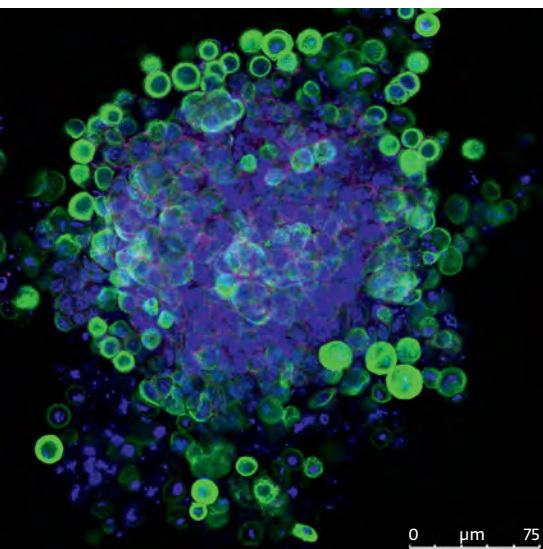
flüssig machen. Denn wollen Forscher die Ursachen von Hautkrebs aufklären, müssen sie bisher Untersuchungen an Mäusen vornehmen. Nun ist es Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Biologie des Alterns in Köln gelungen, im Labor Hautstammzellen von Mäusen zu züchten. Versorgt mit wachstumsfördernden Botenstoffen, bleiben Hautstammzellen in einem Gel aus natürlichen Hautproteinen lange Zeit am Leben. Die Forscher haben zudem herausgefunden, dass sich mit dieser Methode die bereits ausgereiften Zellen zu Stammzellen umprogrammieren lassen. Anstelle von lebender Haut könnten Forscher künftig solche Stammzellen untersuchen und an ihnen auch die Wirkung neuer Krebsmedikamente testen. Als Nächstes wollen die Kölner Wissenschaftler ihre Technik nun an menschliche Zellen anpassen.

([www.mpg.de/10865430](http://www.mpg.de/10865430))

Haarfollikel-Stammzellen in Zellkultur unter dem Mikroskop (blau: Zellkerne; grün: Keratin; rot: Aktin).

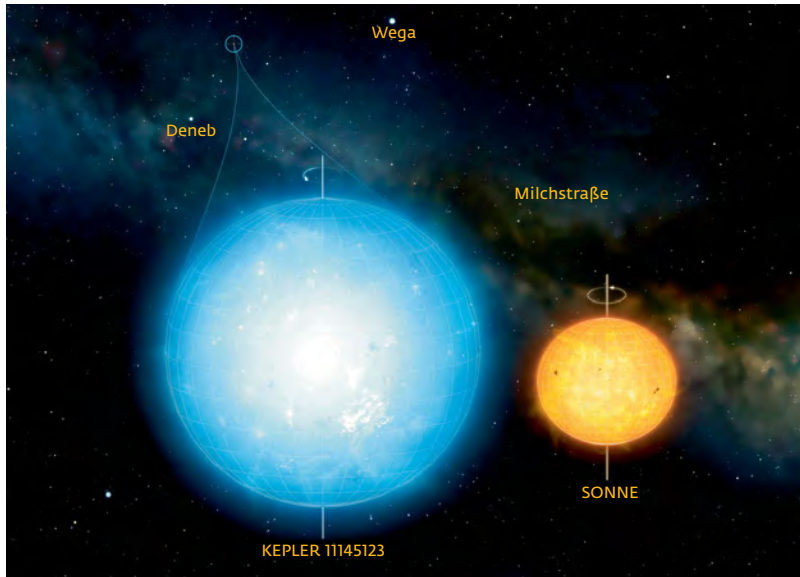
## An den Grenzen der Mikroskopie

Einzelne Proteine bei Ihrer Arbeit in der Zelle zu verfolgen, wird jetzt möglich. Zu diesem Zweck haben Forscher um Stefan Hell, Direktor am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen, das MINFLUX-Fluoreszenzmikroskop entwickelt, mit dem sich zwei fluoreszierende Proteine selbst dann noch unterscheiden lassen, wenn sie nur ein paar Nanometer voneinander entfernt sind – das ist die Grenze dessen, was in einer lebenden Zelle möglich ist. Die Wissenschaftler erreichen dies, indem sie zwei Nobelpreisgekrönte Methoden raffiniert kombinieren: Sie identifizieren die einzelnen fluoreszierenden Moleküle, indem sie die Moleküle zufällig an- und ausschalten. Dann bestimmen sie die exakte Position durch die Anregung mit einem donutförmigen Laserstrahl. Die Forscher nutzen dabei aus, dass sie das Intensitätsprofil dieses Laserstrahls genau kennen. Der ganze Prozess geht so schnell, dass sie auf diese Weise sogar den Weg eines Proteins durch die Zelle verfolgen können. Und die Auflösung wird dabei nur noch durch die Größe des fluoreszierenden Moleküls bestimmt. ([www.mpg.de/10874310](http://www.mpg.de/10874310))



# Ferner Stern ist eine runde Sache

Forscher messen die Form von Kepler 11145123 mit bisher unerreichter Genauigkeit



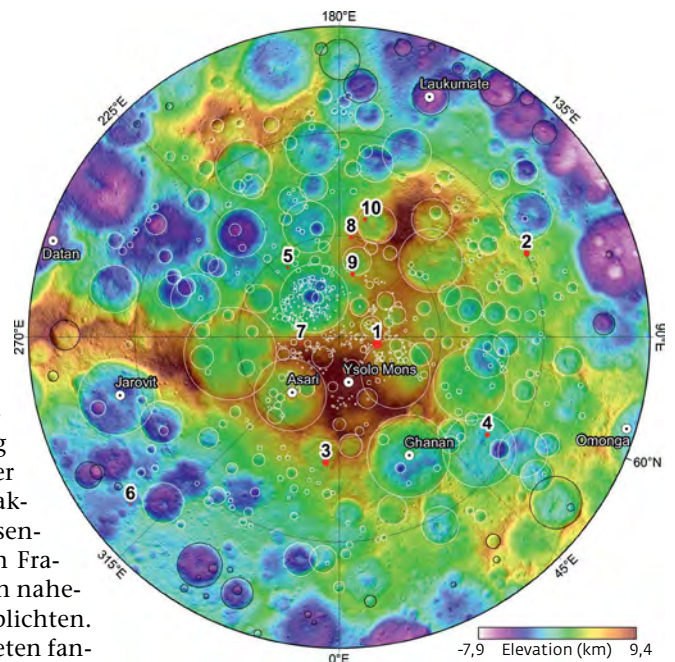
Der Stern Kepler 11145123 ist das rundeste natürliche Objekt im Universum, das je vermessen wurde. Die Schwingungen des Sterns zeigen, dass der Unterschied zwischen äquatorialem und polarem Radius nur drei Kilometer beträgt. Der Stern ist somit deutlich runder als etwa die Sonne.

Sterne sind keine perfekten Kugeln. Während sie sich um ihre Achse drehen, wirkt die Zentrifugalkraft und flacht sie mehr oder weniger stark ab. Ein Team um Laurent Gizon vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung und der Universität Göttingen hat nun diese Abflachung eines langsam rotierenden Sterns mit bisher unerreichter Genauigkeit gemessen. Bei dem mehr als 5000 Lichtjahre entfernten Objekt namens Kepler 11145123 fanden die Wissenschaftler einen Unterschied zwischen dem äquatorialen und dem polaren Radius von nur drei Kilometern. Im Vergleich zum mittleren Radius des Sterns von 1,5 Millionen Kilometern ist diese Abweichung erstaunlich klein – das heißt, der Gasball ist extrem rund. Für ihre Messungen nutzten die Astronomen die Tatsache, dass der Stern schwingt. Sie verglichen die Frequenzen der Schwingungen, die am Äquator stärker auftreten, mit denen, die in höheren Breiten dominieren. Daraus ermittelten sie den Unterschied der beiden Strecken vom Mittelpunkt des Sterns bis zum Pol und vom Mittelpunkt bis zum Äquator. (www.mpg.de/10826254)

## Wassereis in ewiger Polarnacht

Die Kameras der Raumsonde Dawn untersuchen das nördliche Polargebiet des Zwergplaneten Ceres

Zwischen Mars und Jupiter umkreist seit März 2015 die US-Raumsonde Dawn den Zwergplaneten Ceres. Mit ihren Bordkameras aus dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen hat die Sonde den Himmelskörper dabei ins Visier genommen – und ihn praktisch vollständig kartiert. In einer aktuellen Studie berichtet ein Team, geleitet von Göttinger Wissenschaftlern, über Ceres' hohen Norden. Dort haben die beiden Framing Cameras ein besonderes Kunststück vollbracht: An Stellen nahezu ewiger Dunkelheit konnten sie Ablagerungen aus Wassereis ablichten. Unter 634 identifizierten Kratern mit permanenten Dunkelgebieten fanden die Forscher auf den Bildern zehn Krater, die auffällig helle Stellen in ihrem Innern zeigen. Bei einem verhältnismäßig jungen, etwa 3,8 Kilometer durchmessenden Krater reichen die hellen Ablagerungen sogar über das permanente Dunkel hinaus – bis in die Region, in die manchmal auch direktes Sonnenlicht fällt. (www.mpg.de/10859682)



Blick auf den Nordpol: Die Farben zeigen die Höhenverhältnisse in der Landschaft auf Ceres. Zehn Krater sind beziffert, dort haben die Framing Cameras aus dem Göttinger Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung Wassereis entdeckt.

## Der Feind meines Feindes ist mein Freund

Ein Einzeller schützt sich mit Viren vor Viren

Beim Menschen bedeutet eine Virusinfektion für gewöhnlich nichts Gutes. Für einen Einzeller im Meer kann sie dagegen die Rettung sein. Aus Parasitismus wird dann eine Symbiose. Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für medizinische Forschung in Heidelberg zufolge nützt die Partnerschaft allerdings nicht den zuerst infizierten Zellen. Sie müssen sterben, damit die anschließend befallenen leben können. Für den Ein-

zeller *Cafeteria roenbergensis* ist ein Riesenvirus namens CroV eine tödliche Bedrohung. Dockt dieser auf der Zelloberfläche an, veranlasst er seinen Wirt, so lange Riesenviren zu produzieren, bis die Wirtszelle platzt. Wenn eine Zelle zuvor allerdings auch mit sogenannten Maviren infiziert worden ist, setzt sie Partikel beider Virentypen frei. Diese Maviren sind die Rettung für andere Einzeller, denn treffen sie zeitgleich mit den Riesenviren auf neue Wirtszellen, können die Maviren jetzt die Vermehrung der Riesenviren blockieren. Ein simultan von beiden Viren befallener Einzeller setzt deshalb ausschließlich Mavirus-, aber keine neuen CroV-Partikel frei. Noch nicht befallene Einzeller sind also vor einer Infektion mit den Riesenviren geschützt. Als Nächstes wollen die Forscher untersuchen, ob auch andere Einzeller einen solch ungewöhnlichen Verteidigungsmechanismus einsetzen.

([www.mpg.de/10848836](http://www.mpg.de/10848836))



Enge Verbindung: Partikel des Riesenvirus CroV (dunkelblau) und des Mavirus (rosa).

## Wer sich um andere kümmert, lebt länger

Ältere Menschen, die andere unterstützen, leben länger. Das ist das Ergebnis einer Studie unter Beteiligung des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung in Berlin. Ein internationales Team verglich Überlebensanalysen von mehr als 500 Menschen zwischen 70 und 103 Jahren. Danach lebte die Hälfte der Großeltern, die ihre Enkelkinder umsorgten oder ihren Kindern aktiv zur Seite standen, noch etwa zehn Jahre nach einer ersten Befragung. Von denjenigen, die sich nicht engagierten, starb dagegen etwa die Hälfte innerhalb von fünf Jahren. Die Forschenden konnten darüber hinaus belegen, dass sich der positive Effekt auch bei kinderlosen älteren Menschen zeigt, die sich etwa um Freunde oder Nachbarn kümmern. Ralph Hertwig, Direktor am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, hält das Sorgen für andere allerdings nicht für ein Patentrezept, um länger zu leben: „Nur bei einem moderaten Maß von Engagement sind positive Effekte zu erwarten. Wenn es darüber hinausgeht, könnte das zu Stress führen und sich negativ auswirken.“

([www.mpg.de/10874182](http://www.mpg.de/10874182))

## Die schnellste Fliegerin im Tierreich

Brasilianische Freischwanz-Fledermaus ist nicht nur gewandt, sondern hält auch den aktuellen Geschwindigkeitsrekord in der Luft

Die Flugeigenschaften von Vögeln sind bis heute unerreicht und immer noch Vorbild für Flugzeugingenieure. Den Geschwindigkeitsrekord im Horizontalflug hielten folgerichtig auch Vögel aus der Familie der Segler. Mit mehr als 110 Stundenkilometern rasen sie über den Himmel. Fledermäuse dagegen galten wegen ihrer Flügelstruktur und des dadurch größeren Luftwiderstands als langsamer. Ein Irrtum, wie Forscher am Max-Planck-Institut für Ornithologie in Radolfzell nun festgestellt haben. Die Wissenschaftler haben einen neuen Spitzenreiter unter den Akrobaten der

Lüfte entdeckt: Die Brasilianische Freischwanz-Fledermaus schießt mit mehr als 160 Kilometern pro Stunde durch die Nacht – und dies ganz ohne Rückenwind. Diese hohen Geschwindigkeiten erreichen die nur zwölf Gramm schweren Tiere wegen ihres aerodynamischen Körperbaus und der für Fledermäuse überdurchschnittlich langen Flügel.

([www.mpg.de/10820289](http://www.mpg.de/10820289))

Tiere mit langen, schmalen Flügeln fliegen üblicherweise schneller als solche mit kürzeren, breiteren. Mit ihren 160 Stundenkilometern Spitzengeschwindigkeit bestätigt die Brasilianische Freischwanz-Fledermaus diese Regel.



# Zellen auf dem Laufsteg

Leben ist Bewegung und Austausch mit der Umwelt – das gilt auch für Zellen innerhalb eines Organismus. Damit Zellen von einem Ort zum andern gelangen, müssen sie sich aber nicht nur fortbewegen können, sie müssen auch mit ihrer Umgebung in Kontakt treten. **Joachim Spatz** und sein Team verfolgen am **Max-Planck-Institut für medizinische Forschung** in Heidelberg, wie Zellen dabei vorgehen. Der Träger des Leibniz-Preises 2017 schickt diese dafür auf den Laufsteg und durch mit Hindernissen gespickte Parcours und testet ihre mechanischen Hafteigenschaften.

TEXT **CATARINA PIETSCHMANN**

**E**in erwachsener Mensch ist die Summe aus 100 Billionen Zellen – eine kaum vorstellbare Zahl, eine Eins mit vierzehn Nullen. Unsere Körperzellen formen Organe wie Herz und Nieren, Gewebe wie Haut oder Nerven, schwimmen einzeln als Blutkörperchen durch das verzweigte Gefäßsystem und patrouillieren für die Immunabwehr. Aber welche Aufgabe sie auch für das große Ganze übernehmen: Jede Zelle ist ein Individuum! „Sie muss in der Lage sein, ihre Umgebung wahrzunehmen und darauf zu reagieren“, sagt Joachim Spatz. Der Biophysiker leitete bis Ende 2015 die Abteilung „Neue Materialien und Biosysteme“ am Stuttgarter Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme. Seit 2016 ist er mit seinem Team an das Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg umgezogen. Zusammen entwickeln sie biophysikalische Experimente, Messtechniken und Modellsysteme, um die Bewegung und Anhaftung einzelner Zellen und Zellverbände zu erforschen.

Viele Zellen müssen nämlich mehr oder weniger weite Strecken innerhalb des Körpers zurücklegen: Während der Embryonalentwicklung beispielsweise, aber auch bei den ständigen Umbauprozessen im ausgewachsenen Organismus wandern Zellen von ihrem Geburts- zu ihrem endgültigen Bestimmungsort. Dazu sollten sie wissen, wo sie sind und wo sie hinmüssen.

## REZEPTOREN ERFASSEN DIE UMGEBUNG

Doch wie tritt eine Zelle mit ihrer Umwelt in Kontakt? „Zum einen registriert sie chemische Signale über Rezeptoren auf ihrer Zellmembran“, erläutert Spatz. Kleine Moleküle docken an Transmembranproteinen an und aktivieren darüber Signalwege ins Zellinnere. Als Antwort werden – je nach „Info“ – Gene hochgedreht, gedrosselt, an- oder ausgeschaltet.

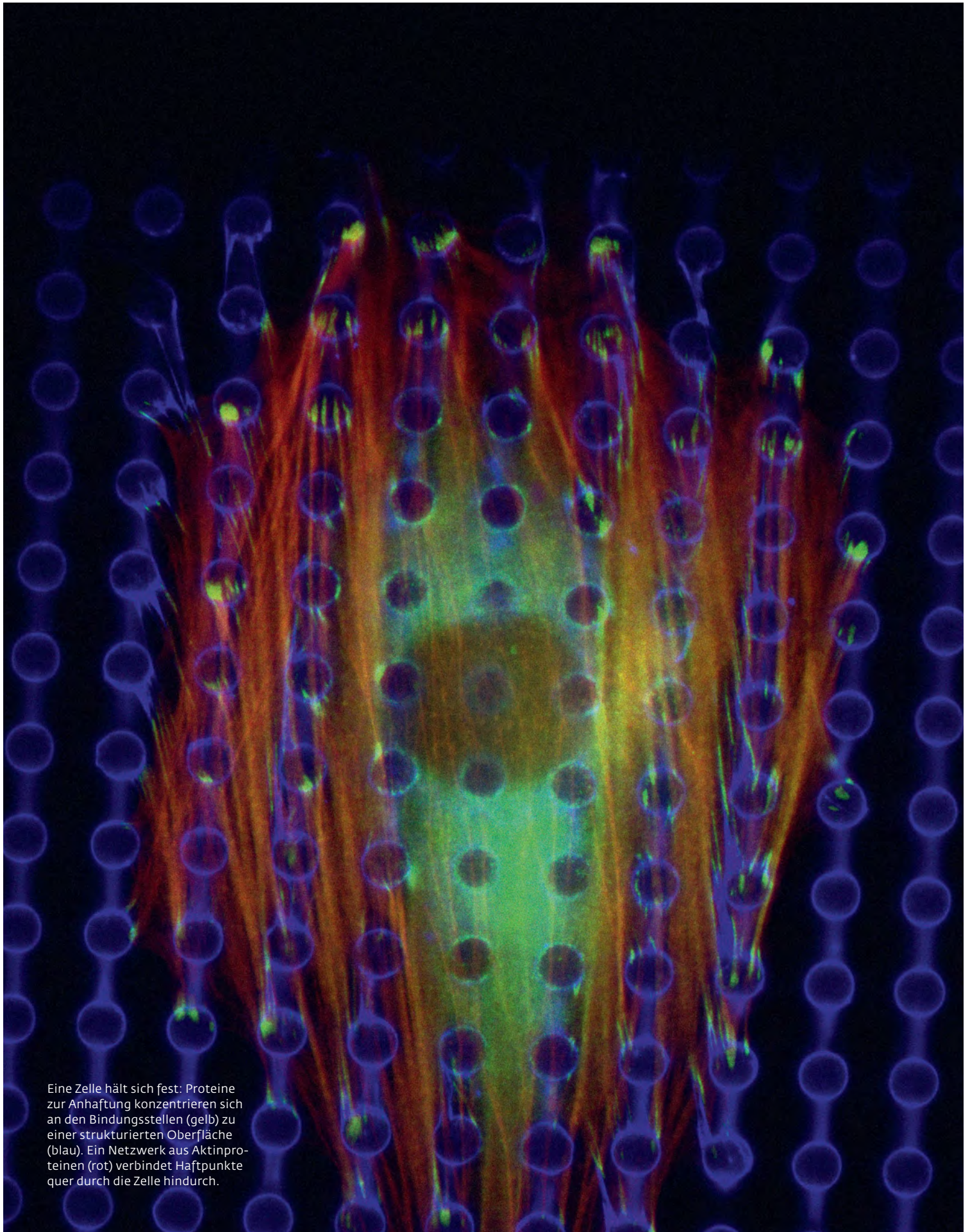
Darüber hinaus nimmt die Zelle ihren Untergrund auch taktil wahr. Sie kann unterscheiden, ob er hart oder

weich ist, indem sie quasi daran zieht. „Das ist so, als würden wir den Boden abtasten“, sagt Spatz. „Ist er weich genug, kann ich mich fallen lassen. Ist er aus Stein, lasse ich das besser.“ Dementsprechend passt auch eine Zelle ihr Verhalten an. „Spürt eine Stammzelle eine harte Umgebung, wird sie sich in Knochen- oder Gewbezellen differenzieren. Auf weichem Untergrund wird sie dagegen eher zu einer Nervenzelle.“

Selbst die Menge kleiner Moleküle in ihrer Nähe kann die Zelle abschätzen. Dies gibt ihr ein Gefühl dafür, wie wichtig diese als „Signalstoffe“ sind und ob sie darauf reagieren sollte. „Für wandernde Zellen ist außerdem entscheidend, wie dicht Moleküle auf einer Oberfläche liegen“, sagt Spatz. „Beträgt der Abstand 60 Nanometer oder mehr, können die Zellen daraus keine Informationen mehr ablesen.“

Um das Verhalten einzelner Zellen zu beobachten, haben Spatz' Mitarbeiter spezielle Laufstege für sie entwickelt: Oberflächen aus Polymeren, die mit feinsten Goldpartikeln beschichtet sind.





Eine Zelle hält sich fest: Proteine zur Anhaftung konzentrieren sich an den Bindungsstellen (gelb) zu einer strukturierten Oberfläche (blau). Ein Netzwerk aus Aktinproteinen (rot) verbindet Haftpunkte quer durch die Zelle hindurch.



Jacopo Di Russo untersucht das Wanderungsverhalten menschlicher Hautzellen und misst, mit welcher Kraft die Zellen an einer Unterlage ziehen. Hierfür bindet er unterschiedliche Proteine an Gele und verändert so die Eigenschaften der Oberfläche.

Das Gold dient als Anker für einzelne Biomoleküle, die chemisch daran gebunden werden – Peptide etwa oder Antikörper, an die wiederum ein Rezeptor der Zelle andocken kann. Das gibt der Zelle Halt, denn ohne diese „Noppen“ wäre die Oberfläche viel zu glatt. Der Abstand der Kontaktpunkte lässt sich durch Wahl des Basispolymers auf 30, 50, 70, 100 oder 150 Nanometer einstellen. Für den „Cellwalk“ werden ein kleines Stück der künstlichen Oberfläche in eine Kulturschale mit Nährlösung gelegt, die Einzelzellen darauf platziert, das Mikroskop scharf gestellt und die Kamera aktiviert.

## BEWEGUNG IM SCHNECKENTEMPO

Wie schnell laufen Zellen eigentlich? „Im Schnitt 30 Mikrometer pro Stunde, sie können aber auch flotte 50 Mikrometer schaffen“, sagt Joachim Spatz lachend. An einem Tag können sie also etwa einen Millimeter zurücklegen – eine entsprechende Ausdauer vorausgesetzt. Die Geschwindigkeit hängt jedoch vom Zelltyp ab. Aber selbst innerhalb einer Zelllinie gibt es „Sprinter“ und

„lahme Enten“, denn die Laufgeschwindigkeit wird auch davon bestimmt, in welchem Entwicklungsstadium sich eine Zelle gerade befindet.

Zellen haben natürlich keine Füße, aber etwas Ähnliches. Sie tapsen über Ausstülpungen vorwärts, Lamellopodien genannt. Die Zellmembran wird dazu nach vorn gewölbt und beult sich aus. „Es ist so, als ob wir einen Fuß nach vorn setzen“, erklärt Spatz. Dann heftet sich das Lamellopodium durch Verlagerung und Neuordnung von Proteinmolekülen im Zellinnern – sogenannten Integrinen sowie Aktin- und Myosinfilamenten – an den Untergrund. Nun werden der Rest des Zellkörpers nach vorne gezogen und die Haftstelle anschließend wieder gelöst. Dann folgt das nächste Schrittlchen – eine Bewegungsform, die auch Amöben praktizieren.

Ein Teil von Spatz' Arbeitsgruppe forschte in den letzten Jahren nicht nur in Stuttgart, sondern auch auf dem Campus der Universität Heidelberg. Dort hatten sich die Arbeiten zur Zellmigration bald herumgesprochen. Eines Tages trat der Parasitologe Friedrich

Frischknecht vom Universitätsklinikum Heidelberg an Spatz heran: Könnte man nicht mal einen „echten“ Einzeller, nämlich den Malariaerreger Plasmodium, auf den Laufsteg setzen?

An der Tropenkrankheit, die durch den Stich einer infizierten Anophelesmücke ausgelöst wird, sterben weltweit pro Jahr noch immer eine halbe Million Menschen. Die Beweglichkeit der Erreger, die beim Einstich aus den Speicheldrüsen der Mücke in die menschliche Haut gelangen, ist ganz entscheidend für den „Erfolg“ der Infektion. „Die sichelförmigen Sporoziten bewegen sich mit einer Spitzengeschwindigkeit von zehn Mikrometern pro Sekunde, also fast 100-mal schneller als menschliche Zellen“, erzählt Frischknecht. „Uns interessiert, wie sie das schaffen.“

Sporoziten bohren sich rotierend durch die Haut, bis sie auf eine Blutkapillare treffen. Sie lassen sich dann mit dem Blutstrom in die Leber tragen, wo sie sich erstmals vermehren. Wie genau sich Sporoziten fortbewegen, war bislang rätselhaft. Klar war nur: Sie tun das weder kriechend noch paddelnd wie Bakterien oder einzellige Algen, denn sie

» Malariaerreger bewegen sich fast 100-mal schneller als menschliche Zellen.

bilden weder Lamellopodien, noch verfügen sie über Geißeln. „Die Sporozoi-ten gleiten ganz elegant, ohne dabei ihre Form zu verändern. Verantwortlich dafür sind spezielle Proteine auf ihrer Oberfläche“, sagt Kai Matuschewski. Der Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie in Berlin und Professor an der Humboldt-Universität ist der Dritte im Bunde bei diesem Projekt.

Für die Plasmodium-Experimente war kein rutschfester Laufsteg gefragt, sondern eher ein Parcours, um den mühsamen Weg der Erreger durch die Haut imitieren zu können. Spatz konstruierte also eine Art Fakirbett in Miniaturformat aus Polymeren, durch das die Parasiten gleiten konnten wie durch einen Wald aus feinsten Nadeln.

Ein Vergleich mit verschiedenen Mutan-ten, denen jeweils ein bestimmtes Protein fehlt, lieferte ihnen völlig neue Einblicke. „Wir können nun direkt beobachten, was tatsächlich passiert. Fehlt Protein X, kann sich der Parasit nicht mehr festhalten. Fehlt Y, klebt er regelrecht am Untergrund fest“, erklärt Matuschewski.

**WINZIGE FÜSSE AUS PROTEINEN**

Ein Sporozoit verfügt über eine riesige Palette Proteine in der Zellmembran, die für die Bewegung notwendig sind und teilweise dieselben Funktionen haben. Hunderte davon sitzen am vorderen Ende des winzigen Zellkörpers und sind über ein Geflecht aus Aktinmole-

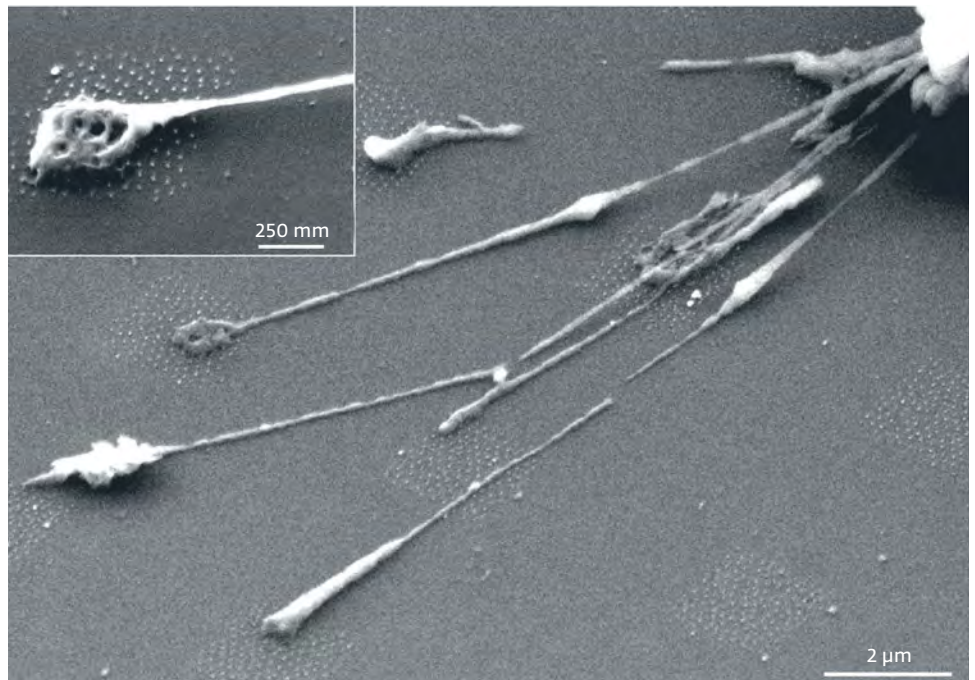
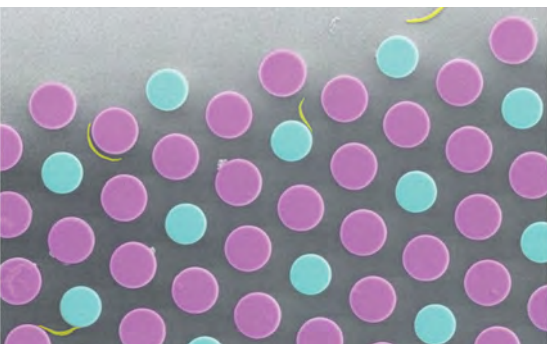
külen mit ihm verknüpft. „Der Parasit lässt die Membranproteine nach hinten wandern und stößt sich daran ab“, erläutert Matuschewski. Die Bewegung ähnelt der eines Tausendfüßlers, bloß dass diese „Füßchen“ hier nur aus einzelnen Molekülen bestehen und deshalb so klein sind, dass nicht mal ein Elektronenmikroskop sie sichtbar machen kann. Die Kraft, die der Parasit aufbringen muss, um sich festzuhalten und wieder abzulösen, kann mithilfe optischer Pinzetten gemessen werden. Daraus können die Forscher weitere Rückschlüsse ziehen, wie sich der Einzeller fortbewegt.

Der Malariaerreger durchläuft einen komplexen Lebenszyklus und nimmt dabei unterschiedliche Gestalten an. >

Fotos und Grafik: MPI für Intelligente Systeme (2)

**Unten** Malariaerreger (gelb) kriechen über eine mit winzigen Säulen besetzte Oberfläche: Besitzen die Einzeller dieselbe Krümmung wie die Säulen, beginnen die einen hundertstel Millimeter langen Erreger um die Hindernisse zu kreisen.

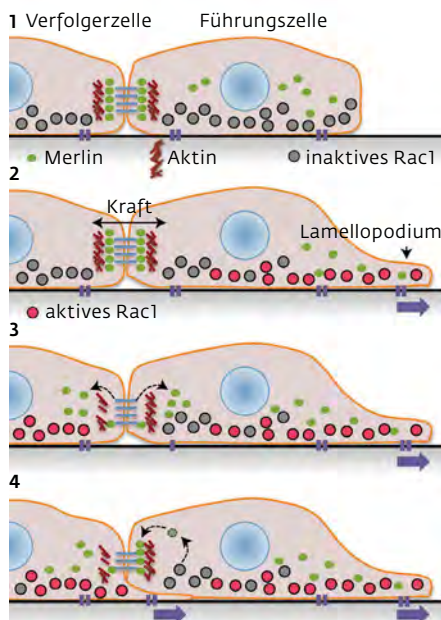
**Rechts** Eine Zelle auf Wanderschaft: Am Ende fadenförmiger Fortsätze bildet sie an besonders strukturierten Stellen Kontaktpunkte zum Untergrund (kleines Bild). Dort nimmt sie die Eigenschaften der Oberfläche wahr und zieht sich förmlich an den Verankerungen nach vorne.





**Oben** Jacopo Di Russo, Katharina Quadt und Medhavi Vishwakarma (von links) bei der Vorbereitung neuer Experimente, mit denen sie die Bewegung von Zellverbänden verändern und messen wollen.

**Unten** Das Protein Merlin (grüne Punkte) reguliert die Bewegungsrichtung der Verfolger einer Führungszelle: **1** Ohne mechanischen oder chemischen Reiz blockiert Merlin die Ausbildung von Lamellopodien. Ohne diese Ausstülpungen kann sich die Zelle nicht in Bewegung setzen. **2 + 3** Zieht die Führungszelle dagegen an der nachfolgenden Zelle, verlässt Merlin in beiden Zellen seinen Platz an der Zellmembran, sodass ein Lamellopodium entstehen kann. Die Verfolgerzelle kann nun der Führungszelle folgen. Zur Bildung eines Lamellopodiums muss auch das Signalmolekül Rac1 aktiviert werden (rote Punkte). Die Zellen wandern immer in die Richtung mit höheren Konzentrationen von aktiviertem Rac1. **4** Wird Rac1 inaktiviert (graue Punkte), blockiert Merlin wieder an der Zellmembran die Bildung von Lamellopodien.



Experten sind sich jedoch einig, dass der Sporozoit eine, wenn nicht die meistversprechende Zielscheibe für einen Impfstoff darstellt, allein schon deswegen, weil man es direkt nach der Infektion nur mit rund 100 Erregern aufnehmen muss. In den späteren Stadien sind es dagegen bereits Milliarden. „Ideale Impfstoffkandidaten sind Antikörper, welche die zwei oder drei wichtigsten bewegungsrelevanten Proteine des Erregers blockieren“, sagt Matuschewski. Kann der Sporozoit nicht gleiten, steckt er in der Haut buchstäblich fest, und die Infektion ist gestoppt.

Nachdem Spatz' Team ausführlich die Bewegungen einzelner Zellen studiert hatte, wandten sich die Forscher dem Wanderverhalten ganzer Zellgruppen zu. So kamen sie zu der Frage: Wie heilt eigentlich eine Wunde?

Ob beim kleinen Schnitt in den Finger, bei aufgeschürften Knien oder tiefen Schnitten nach einer Operation: Epithelzellen müssen in die Wunde „hineinlaufen“, um sie zu schließen und das Gewebe wieder aufzubauen. Das klingt einfach, ist jedoch ein komplexer Prozess: Marschieren im Gleichschritt ist angesagt – oder „kollektive Zellmigration“, wie Joachim Spatz es nennt. Etwas, das bei chronischen Wunden unter anderem nicht mehr funktioniert.

## WANDERUNG UNTER DEM MIKROSKOP

Für ihre Untersuchungen benötigten die Wissenschaftler ein geeignetes Wundmodell. Dazu bestrichen sie den Boden einer Petrischale mit einem Nährboden und ließen Epithelzellen darin wach-

## » Mechanische Spannungen an den Geweberändern fördern die Wundheilung.

sen. Eine Region der Schale blockierten die Forscher, sodass die Zellen dort nicht einwandern konnten. Sobald sie die Blockade entfernten, begannen die Zellen den jetzt freien Raum zu besiedeln. Dabei wurden sie unter dem Mikroskop von einer Kamera beobachtet, die das Geschehen alle zehn Minuten in einem Schnappschuss festhielt.

Bereits nach wenigen Stunden zeigten sich Ausbuchtungen an den ursprünglich geraden Wundrändern. „Das kommt daher, dass einzelne Zellen schneller laufen als andere“, sagt Spatz. Die Reparaturtrupps rücken also nicht in geordneten Linien vor, sondern es gibt „Vorreiter“ – Führungszellen, welche die anderen hinterherziehen. „Sie bilden die Speerspitze des Kollektivs und sind gut zu erkennen, weil sie größer sind und vorneweg laufen.“

Was macht eine Zelle zur Führungszelle? Und wie kommuniziert sie mit den Zellen in ihrem Schlepptau? Um diese Fragen zu beantworten, variierten die Forscher ihre Experimente. Sie deckten den Boden der Kulturschalen mit einem für die Zellen rutschigen Hydrogel ab und säten die Epithelzellen nur in einem kleinen geometrischen Hof in der Mitte aus. Sobald die Kolonien durch Zellteilung diese Kreis-, Dreieck- oder Viereckfläche ausgefüllt hatten, bestrahlten die Forscher das Gel kurzzeitig mit UV-Licht. Dadurch verwandelten sich die glitschigen Flächen in trittfestes Terrain, und die Epithelzellen spazierten los.

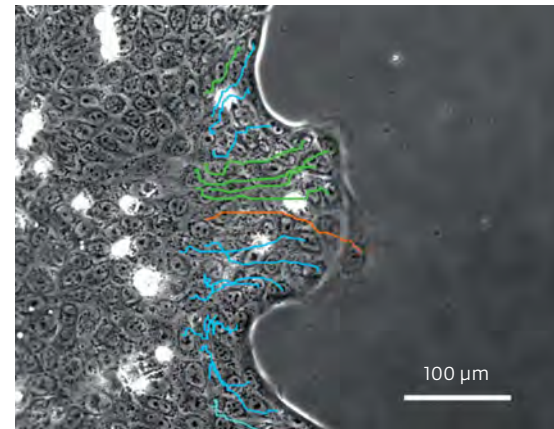
„Wir stellen fest, dass sich an Stellen mit starker Krümmung, also in den Ecken, bevorzugt Führungszellen bilden“, sagt Spatz. Dies lässt sich leicht erklären: Die Kontakte zwischen Zellen werden mechanisch durch sogenannte *tight junctions* stabilisiert – kurze Verstrebungen aus Membranprotei-

nen wie den Cadherinen. Passen die Cadherine von Zelle A zu denen von Zelle B, klicken die extrazellulären Abschnitte dieser Proteine wie Druckknöpfe aneinander, gleichzeitig richtet sich das Aktinskelett im Zellinnern stabilisierend zu den Nachbarzellen hin aus. „Der Rand eines Zellverbands gleicht also ein wenig einer Schafherde, die hinter einem Zaun eingepfercht ist“, sagt Spatz. Dieser „Aktinzaun“ steht unter mechanischer Spannung.

Ist die Krümmung wie bei einem Kreis oder einer geraden Linie überall gleich groß, fällt es schwer, aus der „Herde“ auszubrechen. „Benachbarte Zellen laufen zusammen los und kämpfen um die Führung. Schließlich gewinnt eine, und die anderen fallen zurück.“ Eine Zelle, die aus der Ecke eines Rechtecks losmarschiert, hat jedoch rechts und links keine Nachbarn und wird automatisch zum Anführer. Chirurgen machen sich diesen Effekt unwissentlich zunutze, wenn sie den Skalpellschnitt nicht gerade, sondern etwas gezackt anlegen und so die spätere Zellmigration in die Wunde stimulieren.

### EINER FÜHRT AN, DAS KOLLEKTIV FOLGT

Prinzipiell hat wohl jede Zelle Führungsqualitäten, vermuten die Forscher. Ob sie diese nutzen kann, hängt also entscheidend von ihrer Position am Wundrand ab. Ist diese Position nicht entscheidend, wenn beispielsweise der Wundrand gerade verläuft, entscheiden die hinteren Zellreihen, welche Zelle Führungszelle wird. Letztlich ist die Entscheidung über die Führung eines Kollektivs nicht eine autonome Entscheidung der Führungszelle, sondern eine Entscheidung des Kollektivs. Diese Entscheidung wird physikalisch



Wundheilung in der Petrischale: Epithelzellen der Haut wandern zusammen in einen Bereich ohne Zellen. Die farblich dargestellten Wege zeigen die Bewegungen der Zellen über einen Zeitraum von mehr als fünf Stunden.

rein mechanisch im Kollektiv reguliert. Bleibt die Frage: Wie kommuniziert die Anführerin mit den Verfolgern?

Zunächst haben die Forscher Geschwindigkeit und Richtung der Bewegungen jeder einzelnen Zelle eines Zellverbandes gemessen. „Man erkennt so, dass sich Domänen von 20 bis 30 Zellen bilden, die gemeinsam schnell in eine Richtung marschieren“, erzählt Joachim Spatz. Diese Zellen bilden die sogenannte Persistenzlänge, also die Strecke, über welche Zellen koordiniert in eine Richtung marschieren.

Danach ging die Arbeit aber erst richtig los. „Denn in der molekularen Zellbiologie kennen wir Hunderte Proteine, die als Signalmolekül für Zellmigration dienen“, sagt Spatz. „Für jedes einzelne haben wir das entsprechende Gen ausgeschaltet – sodass die Zelle das Protein nicht bilden kann – und dann die Persistenzlänge der Mutante biophysikalisch gemessen.“ Das überras-



Medhavi Vishwakarma, Freddy Frischknecht, Joachim Spatz, Jacopo di Russo und Katharina Quadt (von links) bei der Datenanalyse. Mit dem Protein Merlin haben die Wissenschaftler ein Schlüssel-molekül für die Wanderung von Zellverbänden entdeckt.

schende Ergebnis: Beinahe alle diese Proteine sind für die kollektive Bewegung ohne Belang. Nur wenn das Membranprotein Merlin fehlt, bricht das Kollektiv auseinander.

Erstaunlich, dass die Zelle sich nur auf eine einzige Molekülsorte verlässt und nicht mindestens ein Reserveprotein in petto hat. Merlin ist keine Neuentdeckung, sondern aus der Tumorbio-logie bereits bekannt. Anders als bei der Wundheilung ist der „Herdentrieb“ von Zellen genau das, was ein Tumor bei der Metastasierung zu verhindern sucht. Denn einzelne Krebszellen sind effizienter und kommen im Gewebe schneller voran als eine große Gruppe. Vom Blut lassen sie sich in entfernte Winkel des Körpers spülen, um dort an geeigneter Stelle zu ankern und sich ungehemmt zu teilen. „Merlin ist ein Metastasen-Unterdrücker“, erklärt Spatz. „Ist das Protein in Krebszellen sehr aktiv, ist das ein gutes Zeichen: Sie bleiben eher zusammen und bilden folglich seltener Metastasen.“

Bekannt war, dass Merlin sich zwischen Zellmembran und Zellskelett positioniert. Bei der kollektiven Zellmigration beobachteten Spatz' Mitarbeiter – sie hatten Merlin mit einem Farbstoff mar-

kiert –, dass das Protein diesen Platz verlässt und sich stattdessen im gesamten Zellinnern wiederfindet. Aber warum?

Die Hypothese: Läuft die Führungszelle schnell voran, entsteht Spannung zwischen den Zellen. „So, als würde ein Mensch einen anderen beim Laufen an der Hand hinter sich herziehen“, erklärt Spatz. Merlin ist wie ein Kraftsensor, der diese Spannung spürt. Er verschwindet daraufhin ins Zellinnere und macht an der Membran Platz, damit die Verfolgerzelle ihr Lamellopodium auswölben und der Führungszelle hinterhertapsen kann. „Würde Merlin das nicht tun, könnte die Zelle nicht folgen, weil Merlin an der Membran quasi wie eine Bremse für Lamellopodien wirkt.“ Und da das Protein nur an der Stelle Platz macht, an der die Führungszelle zieht, ist die Lauf-richtung bereits vorgegeben. Dieser Prozess pflanzt sich bis zur letzten Reihe des Zellverbands fort – buchstäblich Zug um Zug. Mechanische Spannungen forcieren also die Kollektivbildung und helfen so bei der Wundheilung.

Und woher weiß die Führungszelle, in welche Richtung sie laufen muss? „In unserem Modell kann sie sich nur in eine Richtung bewegen, nämlich in den freien Raum hinein. Von einer

echten Wunde werden jedoch Signalfstoffe ausgeschüttet, die den Zellen an den Rändern Informationen über die Richtung vermitteln.“ Inzwischen hat Spatz' Team zusammen mit der Uni Heidelberg die Experimente an Modellen der menschlichen Haut wiederholt und bestätigt.

### UNKOORDINIERTER BEWEGUNG OHNE MERLIN

Die Forscher fanden auch heraus, dass sich ohne Merlin mehr Führungszellen bilden, aber die Wunde langsamer zu-wächst, da der Bewegungsprozess der vielen Zellen nicht mehr koordiniert abläuft.

Derzeit schaut sich Spatz auch die Bewegung von Tumorzellen genauer an. „Anders als gesunde Zellen haben sie die Tendenz, ihre Umgebung teilweise zu ignorieren. Schlecht für den Patienten – aber gut für den Krebs!“ Metastasierende Tumorzellen drosseln nicht nur ihre Merlin-Produktion, sondern auch die der Cadherin-Kontaktpoteine. So können sie sich, ohne von anderen Zellen erkannt oder festgehalten zu werden, ganz lang und schmal machen, zwischen den Zellen eines

Gewebes hindurchschlüpfen und in neue Körperregionen vordringen.

Zellmigration findet jedoch nicht nur in Wunden und bei Krebs statt, sondern immer und überall im Körper. „Würden Zellen nicht zusammenhalten, miteinander kommunizieren und wandern, gäbe es uns nicht. Das Wander- und Wechselwirkungsverhalten von Zellen ist die Voraussetzung für die Entwicklung vielzelliger Organismen – und damit des Lebens, wie wir es kennen.“

Kommunikation mit der Umwelt ist also das Lebenselixier einer Zelle. Das hat sie mit uns, ihrem 100-Billionen-Kollektiv, gemeinsam. Doch was passiert, wenn längere Zeit Funkstille herrscht? Der Mensch würde vereinsamen, mancher würde depressiv, der andere wäre sich vielleicht selbst genug. Wieder andere würden alte Kontakte wiederbeleben oder neue suchen. Die Zelle hingegen hat keine Wahl: Sie knipst ein angeborenes Selbstmordprogramm an und stirbt. ◀

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Proteine in der Zellmembran vermitteln einer Zelle Informationen über ihre Umgebung, etwa über die Beschaffenheit des Untergrunds. Durch Umbauten des Zellskeletts kann sie kleine Ausstülpungen ihrer Zellmembran bilden, mit denen sie sich fortbewegt.**
- **Wandern Epithelzellen in ein unbesiedeltes Gebiet ein, werden manche von ihnen zu Führungszellen, denen die übrigen folgen. Solche Führungszellen entstehen vor allem an Stellen, an denen der Geweberand stark gekrümmt ist, zum Beispiel an Ecken und Kanten.**
- **Das Membranprotein Merlin hält Gruppen von Zellen auf ihrer Wanderung zusammen. Es erspürt die mechanische Spannung, die entsteht, wenn eine vorauslaufende Zelle an den nachfolgenden zieht, und macht es möglich, dass an den Zugpunkten kleine Ausstülpungen zur Fortbewegung gebildet werden.**

### GLOSSAR

**Lamellopodien:** Breite Ausstülpungen der Membran an der Vorderseite mobiler Zellen. Sie werden auch als Scheinfüßchen bezeichnet. Ein zweidimensionales Gerüst aus fadenförmigen Aktinproteinen verleiht ihnen Stabilität und Zugkraft. Lamellopodien dienen der Fortbewegung oder dem Umfließen und der Aufnahme von Nahrungspartikeln (Phagozytose).

**Optische Pinzette:** Methode, mit der Wissenschaftler die Kräfte messen können, die einzelne Moleküle aufeinander ausüben. Dazu werden die beiden zu untersuchenden Moleküle je an ein Kunststoffkügelchen geheftet. Zwei Laserstrahlen halten die Kügelchen in Position. Sobald die Moleküle miteinander wechselwirken und aneinander ziehen, messen Sensoren die Kraft, die die Laser aufwenden müssen, um die Kügelchen in Position zu halten.

AcademiaNet 

exzellente Wissenschaftlerinnen im Blick

#### Das Projekt

AcademiaNet ist eine Datenbank mit Profilen von über 2.200 exzellenter Forscherinnen aus allen Fachdisziplinen.

Folgen Sie uns:



#### Unser Ziel

Frauen sind in wissenschaftlichen Führungspositionen unterrepräsentiert. Wir wollen Ihnen mit unserem Rechercheportal die Besetzung von Führungspositionen und Gremien mit Wissenschaftlerinnen erleichtern.

#### Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

**nature** **Spektrum**  
der Wissenschaft

Sie wollen mehr erfahren?

[www.academia-net.de](http://www.academia-net.de)



# Eine Perspektive fürs Leben

Mit der Entdeckung, dass sich auch kleine organische Moleküle hervorragend als Katalysatoren eignen, gehört **Ben List**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Kohlenforschung**, zu den Pionieren eines neuen Forschungsfeldes in der Chemie. Mindestens ebenso geprägt wurde sein Leben jedoch von einem einschneidenden Urlaubserlebnis.

TEXT **CATARINA PIETSCHMANN**

**U**m über die Arbeit eines Forschers schreiben zu können, reicht es oft schon, ein paar seiner Publikationen zu lesen. Über den Menschen verraten die jedoch nichts. Um ihn kennenzulernen und porträtieren zu können, müssen meist wenige Stunden genügen. In diesem Fall war das anders, denn Ben List und ich haben zwei Jahre gemeinsam promoviert. Lange her ist das inzwischen: Fast 20 Jahre hatten wir uns nicht gesehen. So gab es bei unserem Wiedersehen viel zu erzählen. Bens Leben hat seit unserer gemeinsamen Zeit an der Uni einen außergewöhnlichen Verlauf genommen. Der Leibniz-Preis, den der Pionier auf dem Gebiet der organischen Katalyse 2016 erhielt, ist ein Anlass, darüber zu berichten.

Der Anruf, mit dem er die Nachricht von der Kür zum Leibniz-Preisträger bekommt, erreicht Ben List an einem strahlenden Wintermorgen in Kalifornien.

Perfektes Timing, denn in San Diego war er nicht nur zum Vortrag eingeladen – man wollte ihn abwerben. Wieder hier forschen und leben? Mal ehrlich, das war schon verlockend. Ein Labor mit Blick auf den Pazifik, wo Pelikane lässig den Luftraum kreuzen und im Januar die Wale vorbeiziehen? „Aber die Bedingungen, die ich bei Max-Planck habe, diese Freiheit – gerade jetzt mit dem Leibniz-Preis –, das war einfach unschlagbar“, sagt Ben List lächelnd. Der 48-Jährige leitet seit 2005 die Abteilung „Homogene Katalyse“ am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung.

## „MUSIKALISCHE FRÜHERZIEHUNG HÄTTE ICH GERN GEHABT“

Sollte es ein Forscher-Gen geben, war es lange vor ihm in der Familie verankert. Jacob Volhard (1834 bis 1910), ein Schüler Justus von Liebig und wie dieser ein bekannter Chemiker, war Ben Lists Ur-

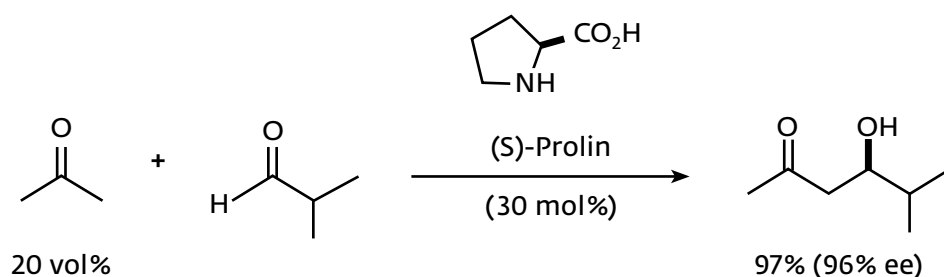
urgroßvater. Der Urgroßvater, Franz Volhard, machte sich als Nephrologe einen Namen. Und Tante Christiane (Nüsslein-Volhard), Entwicklungsbiologin und Max-Planck-Kollegin, erhielt 1995 den Nobelpreis.

In einer großbürgerlichen Familie in Frankfurt sei er aufgewachsen, erzählt List. Wenn die Geschwister der Mutter an Weihnachten zusammenkamen, lagen Bachs *Brandenburgische Konzerte* auf dem Notenständer. „Sieht so aus, als wäre die Spur für mich vorgezeichnet gewesen. Aber die Realität war eine andere.“ Als Ben List drei Jahre alt ist, lassen die Eltern sich scheiden. Seine Mutter arbeitet nun ganztags als Architektin, Ben List und seine beiden Brüder gehen in den Kinderladen. Antiautoritäre Erziehung war damals in. „Wir waren viel auf uns allein gestellt. Musikalische Früherziehung hätte ich gern gehabt.“ Angehalten, ein Instrument zu erlernen, wurde er





Yoga im Labor – so etwas macht Ben List nur für den Fotografen. Wenn er morgens ins Büro kommt, hat er seine Übungen gewöhnlich schon absolviert.



**Oben** Ein Plan für ein neues Forschungsfeld: Ben List katalysierte diese chemische Reaktion erstmals mit der Aminosäure Prolin, dargestellt über dem Pfeil – und erzielte eine Ausbeute von 97 Prozent. Eine der beiden spiegelbildlichen Versionen des Produkts entstand dabei mit einem Überschuss (ee – *enantiomeric excess*) von 96 Prozent. Seither suchen viele Chemiker nach rein organischen Molekülen, um sie als Reaktionsbeschleuniger einzusetzen.

**Unten** Chemische Kochnische: Die Apparaturen, in denen Chemiker neue Substanzen erzeugen, sind gewöhnlich wesentlich komplexer als die Ausstattung der meisten Küchen. Heizplatten gibt es hier aber auch.



aber nicht. Wenn die Jungs Interesse an der Musik haben, kommt das schon von selbst, so die Ansicht der Mutter. Du machst das schon! Du kannst alles werden – Dirigent, Künstler oder ein berühmter Chemiker. „Dieses Vertrauen hatte sie immer“, sagt List im Rückblick.

### SEIN EHRGEIZIGES ZIEL: DIE SYNTHESE VON VITAMIN B<sub>12</sub>

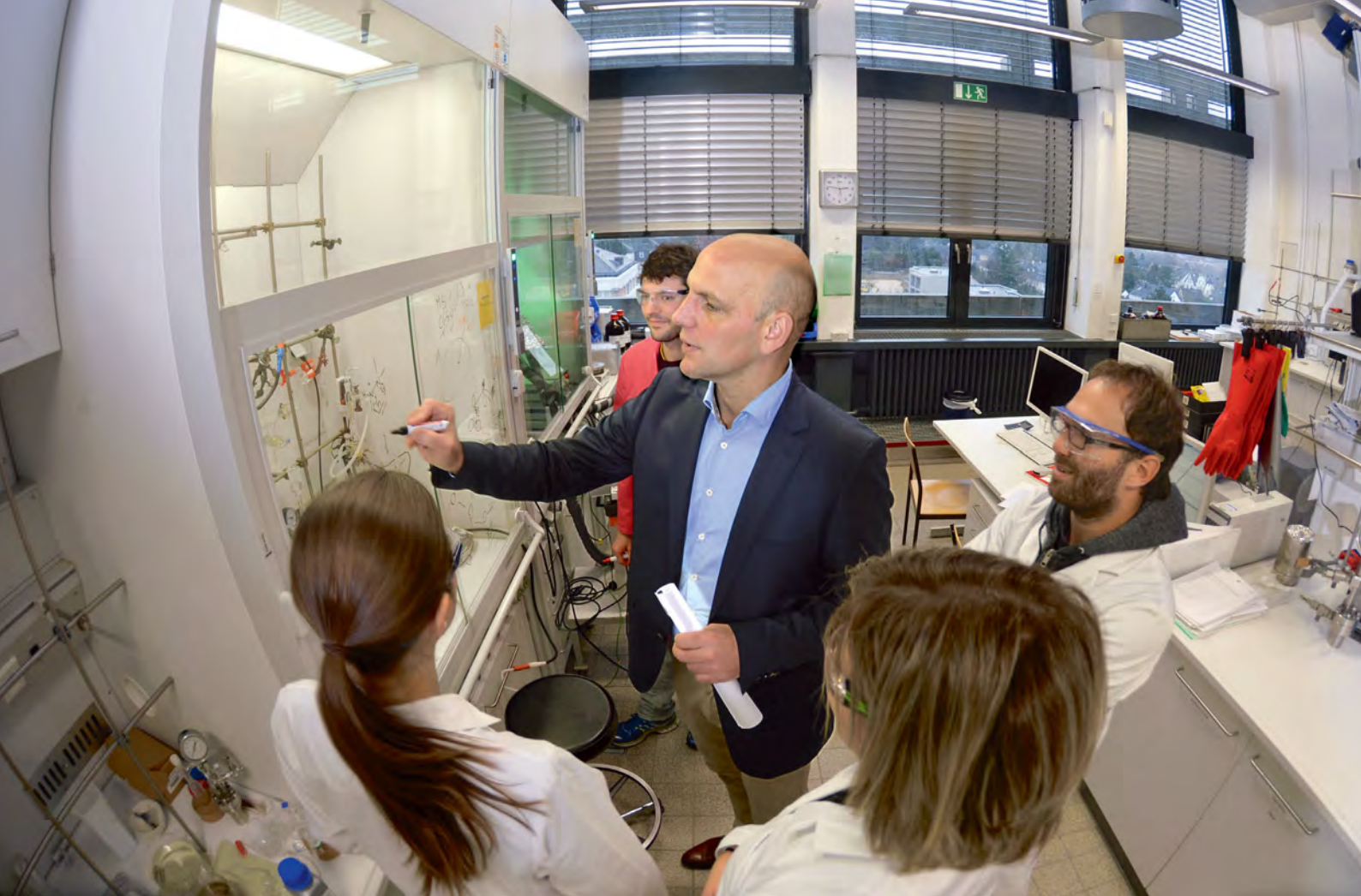
Als Schüler bewegen ihn geradezu philosophische Fragen: Woraus besteht die Welt? Woraus der Mensch? Antworten darauf versprach die Chemie. Damals hielt Ben List Chemiker sogar für allwissend. „Ziemlich naiv“, sagt er heute. „Aber als ich merkte, dass sie nicht die Antwort auf alles haben, war ich vom Fach längst angefixt.“ Nach dem Abitur reist er mit zwei Freunden erst einmal drei Monate durch Indien. Die anderen hatten ihr Studium bereits vorab organisiert. „Nur ich hatte mir überhaupt keine Gedanken gemacht. Als ich zurückkam, wurde meine Mutter erstaunlich energisch: Also, Ben, irgendwas müsstest du jetzt mal machen!“ Chemie studieren, klar, und in Berlin, auch klar. (Da wohnte ein Cousin.) Also rief List die Auskunft an und fragte nach der Nummer der Berliner Universität. „Welche denn?“, fragte die Stimme am Telefon irritiert. „Wählen Sie einfach eine aus!“ Ben List lacht. „Ja, so kam ich an die FU Berlin.“

Im dritten Semester standen organische Chemie und damit Vorlesungen bei Johann Mulzer an. „Die waren so

perfekt!“ Ohne Hast und mit viel farbiger Kreide entwarf der Spezialist für enantioselektive Naturstoffsynthese gewaltige Tafelbilder, in denen er Schritt für Schritt den Weg hin zu komplizierten Antibiotika oder Hormonen nachzeichnete. Keine Frage, Ben List musste einfach in Mulzers Team.

Und er hatte sich ein ehrgeiziges Ziel gesetzt: Vitamin B<sub>12</sub> sollte sein Molekül werden! Die Summenformel C<sub>72</sub>H<sub>100</sub>CoN<sub>18</sub>O<sub>17</sub>P lässt erahnen, wie komplex die Struktur ist – und Mulzer warnte ihn nicht. „In meiner Ahnungslosigkeit dachte ich: eine Hälfte im Diplom, die andere als Doktorarbeit. Das war der Plan.“ Vitamin B<sub>12</sub> wurde erstmals 1972 synthetisiert, von Albert Eschenmoser (ETH Zürich) und Robert B. Woodward (Harvard) gemeinsam. „Zehn Jahre hatten über 100 Doktoranden und Postdocs daran gearbeitet. Und ich dachte, ich schaff das allein“, sagt Ben List kopfschüttelnd. Sein Ziel war es, das Molekül eleganter und in weniger Schritten herzustellen. Irgendwann bremste Mulzer ihn. Es reiche, wenn er die beiden oberen Ringe schaffe, die „Nordseite“ quasi. Erstbesteigung einer Nordwand traf es eher. Doch Ben List erreichte das Gipfelkreuz und blickte stolz hinab. Da unten stand ein „summa cum laude“.

„Ein Molekül Stück für Stück zusammensetzen, ist hochelegant und ästhetisch, fast schon Kunst.“ Totalsynthese nennen Chemiker dieses Vorgehen. Auf diese Weise Naturstoffe nachzubauen, war in den 1990er-Jah-



So könnte es gehen! Ben List und seine Mitarbeiter entwickeln gemeinsam Ideen für neue Reaktionen. Nicht untypisch: Als Tafel dient ihnen die Frontscheibe eines Abzugs, aus dem eventuell frei werdende Gase direkt abgepumpt werden.

ren absolut angesagt – doch wirklich praktisch war die Totalsynthese nie. Immer gab es Nebenprodukte, was aufwendige Trennprozesse und jede Menge Abfälle bedeutete, meint List heute.

Wäre es nicht besser, Reaktionen durch Katalysatoren selektiv zu kontrollieren, also so, dass ausschließlich das gewünschte Produkt entsteht? So wie Enzyme es in der Natur oft tun? Das wäre wirklich elegant! Ende der 1980er-Jahre war die Forschung an Abzymen – katalytisch wirkenden Antikörpern, wie sie das Immunsystem bildet – gerade ein heißes Thema. Am Scripps Research Institute in La Jolla (Südkalifornien) versuchte Richard Lerner Abzyme zu nutzen, um quasi jede irgendwie katalysierbare Reaktion selektiv zu katalysieren. Ben List hatte davon gelesen: Klang verrückt – aber spannend. Das wollte er machen! „Ohne jemanden zu fragen natürlich, geschweige denn meinen Doktorvater.“ Ben List war es gewohnt, seine Entscheidungen allein zu treffen. Da machte sich die antiautoritäre Erzie-

hung bemerkbar. „Punktuell hab ich sie auch bei meinen Kindern eingesetzt“, schiebt er schmunzelnd ein. „Du bist zwar erst zwölf, aber wenn du meinst, es ist gut für dich, jetzt zehn Hanutas zu essen, dann mach es. Ich vertraue dir. Aber mein Rat ist: Ich würd’s lassen.“

### AB 1999: DIE EXPEDITION INS EIGENE FORSCHUNGSFELD

Von seinem Entschluss, ans Scripps Research Institute zu gehen, hätte ihn aber wahrscheinlich kein noch so gut gemeinter Ratschlag abbringen können. Mit einem Stipendium der Alexander von Humboldt-Stiftung setzte er ihn um. Wie cool! Dort liefen Forscher wie K. C. Nicolaou oder Barry Sharpless herum. Namen, die man von chemischen Reaktionen oder Molekülen kannte. „Alle trugen kurze Hosen und T-Shirts, waren nur ‚Bills‘ und ‚Nics‘ – es war schließlich Kalifornien! Die Aktivierungsbarriere, um ins Gespräch zu kommen, war extrem nied-

rig.“ Vermittler waren da kaum nötig – anders als bei vielen Molekülen, die miteinander reagieren sollen. Sie brauchen Katalysatoren, um die Energiebarriere zu senken, die sie daran hindert, in Kontakt zu treten.

Besonders Biokatalysatoren, also Enzyme, beschleunigen bestimmte Reaktionen rasant, manche um den Faktor  $10^{18}$ ! Am Scripps Institute hatte man gerade einen katalytischen Antikörper für das Enzym Aldolase entdeckt, der im Erlenmeyerkolben immerhin schon einen Turbo von  $10^8$  anwarf. Damit konnte Ben List sich nun austoben. „Es war eine euphorische Zeit. In weniger als zwei Jahren publizierte ich 17 Artikel in namhaften Journalen.“

Nach einem Jahr war seine Freundin aus Deutschland nachgezogen. Sie heirateten ganz romantisch am Strand. Fast zeitgleich bot Richard Lerner ihm eine Assistenzprofessur am Scripps Institute an. Anfang 1999 startete Ben List mit zwei Mitarbeitern auch die Expedition in ein eigenes Forschungsgebiet. >



Würde sich auch in einer Kunstgalerie gut machen: In den Glasröhrchen untersuchen die Mülheimer Chemiker Produkte chemischer Reaktionen.

„Ich wollte kleine organische Moleküle designen, die als Katalysatoren fungieren.“ Das war Neuland. Niemand zuvor hatte dieses Konzept verfolgt. Die gängigen industriierprobten Katalysatoren basierten und basieren auch heute noch meist auf Übergangsmetallen wie Palladium, Nickel, Titan. Sie sind teuer, meist giftig und müssen aufwendig wieder abgetrennt werden. Enzyme machen es so viel sanfter, mit einfachen organischen Gruppen wie Carbonsäuren, Aminen und Alkoholen. „Doch die organischen Chemiker haben den eigenen Molekülen kaum etwas zugetraut.“

Von jenem Enzym, dessen Antikörper-Analogon Ben List nun in- und auswendig kannte, wusste man, dass am aktiven Zentrum eine Aminogruppe und ein Säurerest sitzen. Amino... Säure!, ging List durch den Kopf. Hatte er da nicht was im Studium gehört? Bei einer Reaktion, die später den sperrigen Namen Hajos-Parrish-Eder-Sauer-Wiechert-Reaktion bekam, war die Aminosäure Prolin erfolgreich katalytisch ein-

gesetzt worden – damals eine Skurrilität. Aber was, wenn Prolin nun mit einem ähnlichen Mechanismus arbeitete wie ein Enzym? Und wenn es auch andere Reaktionen katalysierte?

### „MAN DENKT: VIELLEICHT WAR DAS EINE DOOFE IDEE“

Ben List nahm einen Glaskolben, gab ein wenig Prolin und zwei Reaktionspartner hinein und ließ alles über Nacht bei Raumtemperatur rühren. Es war sein erstes unabhängiges Experiment. „Ich war total unsicher. Man denkt ja nicht: Ha! Das hab *ich* designt! Und nun werde ich weltberühmt! Nein, eher: Hmm... Vielleicht war das eine ganz doofe Idee. Andere haben das sicher schon probiert und wissen auch, warum es nicht klappt.“

Am nächsten Tag waren die Ausgangsstoffe vollständig umgesetzt, und von zwei möglichen Produkten war zu 72 Prozent das Gewünschte entstanden. „Bei einer ähnlichen Reaktion hat-

ten wir kurz darauf schon einen Enantiomeren-Überschuss von fast 100 Prozent!“ Enantiomere sind die zwei Varianten von Substanzen, deren Moleküle gleich aufgebaut sind, abgesehen davon, dass das eine Enantiomer das Spiegelbild des anderen darstellt. Chemisch ähneln sich die beiden Versionen so sehr, dass es schwierig ist, ausschließlich die eine zu synthetisieren. Biologisch verhalten sich Enantiomere meist unterschiedlich. So kann das eine als Arzneimittel wirken, das andere hat dagegen möglicherweise keinen Effekt oder sogar einen schädlichen.

So überrascht es nicht, dass die Publikation, die im Jahr 2000 im JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY erschien, die Fachwelt zugleich irritierte und begeisterte und inzwischen 2200-mal zitiert wurde. Ein organischer Katalysator! Ein billiges, essbares Molekül, das im menschlichen Körper vorkommt und nicht nur katalytisch aktiv ist, sondern auch noch selektiver als jeder andere Katalysator zuvor? Wie konnte das

» Ein organischer Katalysator! Ein billiges, essbares Molekül, das im menschlichen Körper vorkommt – und auch noch selektiver ist als jeder andere Katalysator zuvor? Wahnsinn!

sein? Wahnsinn! Drei Monate später erschien ein Artikel von David MacMillan: Er hatte fast zeitgleich in Berkeley eine ähnliche Reaktion entdeckt. Nun glaubten es auch die Zweifler.

Dann rollte die Welle los. „Erst einige wenige, später Hunderte Gruppen in den USA, Japan, China und Europa katalysierten ihre Reaktionen nun mit Prolin oder ähnlichen organischen Katalysatoren und publizierten darüber. Alle wollten Teil der Entwicklung sein. Es war total verrückt!“, erinnert sich List. Er selbst war in einer unsicheren Situation: Er hatte nun Familie, nur ein winziges Team und noch keine Festanstellung (Tenure). Doch dann warb er endlich einen großen Batzen an Forschungsgeldern von den National Institutes of Health (NIH) ein.

Ende 2002 kam Alois Fürstner, Direktor der Abteilung „Metallorganische Chemie“ am Mülheimer Max-Planck-Institut, zu List ins Büro. Fürstner hatte am Scripps einen Vortrag gehalten und war überrascht. „What? You are German? Sie müssen nach Deutschland zurückkommen! Und zwar zu uns!“ Eine Woche später flog List nach Mülheim. Man bot ihm eine Festanstellung an, mit Aussicht auf einen Direktorenposten – und er nahm an. Im Sommer 2004 rückte der Chefessel dann schon in Sichtweite. Ehe er diesen Posten antritt, fliegt List mit seiner Frau und den beiden Söhnen über Weihnachten in die Wärme. An den Strand von Khao Lak in Thailand. Die Reise sollte ein einschneidendes Erlebnis werden.

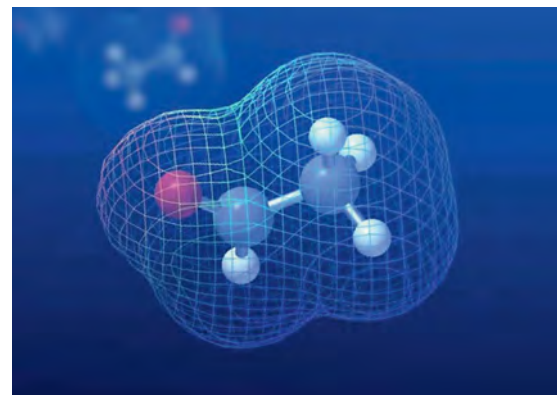
Am letzten Urlaubstag – die Koffer waren bereits gepackt – werden sie durch eine Erschütterung geweckt. „Wohl eines der kleinen Erdbeben, mutmaßten wir und vergaßen es gleich

wieder.“ Es war der 26. Dezember 2004. Nach dem Frühstück ging es ein letztes Mal an den Pool. Theo und Paul, die beiden drei und fünf Jahre alten Jungs, toben im Wasser, Ben List liest im Liegestuhl, als er ein Rauschen hört, das stetig anschwillt. Er sieht zum Strand, hört nun Rufe. Run! Run! RUN!!! „Ich sah meine Frau an, jeder schnappte sich ein Kind, und wir rannten los.“

### DIE GRAUE BRÜHE REISST BEN LIST MIT SICH

Das Poolhaus, hinter dem er Deckung sucht, ist aus Holz. Ein Witz nur für die gewaltige Tsunamiwelle. Die graue, dreckige Brühe steigt rasant schnell, schwappt über das Dach, reißt das Haus und Ben List mit sich. Trümmerteile donnern auf ihn. „Paul, den ich eben noch im Arm hatte, war plötzlich weg.“ Ben List wird unter Wasser gedrückt, kommt noch einmal kurz an die Oberfläche und wird dann sehr lange nach unten gezogen. Das war's also ... schade ... ein bisschen früh, geht ihm durch den Kopf. „Da war keine Panik, eher Verwunderung.“ Doch er kommt erneut nach oben, fängt nun an zu kämpfen und rettet sich auf einen Baum. Ben List hat diverse Schnittwunden und eine große Wunde am Fuß. Für ihn war es schon extrem knapp gewesen – Paul konnte es nicht überlebt haben. Er fragt sich durch: Jemand hatte seine Frau gesehen, mit einem Kind. Gott sei Dank, offenbar hatte sie Theo gerettet. Als Ben List sie schließlich findet, ist jedoch Paul bei ihr.

„Er war ganz blass, am Brustkorb verletzt. Alles okay, Papi, hat er geflüstert.“ Von Theo keine Spur. Ein Lastwagen bringt sie und andere Verletzte 150



**Oben** Mit der Dünnschichtchromatografie trennen Chemiker verschiedene Produkte, die bei Reaktionen entstehen. Zu diesem Zweck versetzen sie die eine Seite einer Chromatografieplatte mit der Lösung des Substanzgemischs. Wenn die Lösung über die Platte kriecht, setzen sich die verschiedenen Produkte an unterschiedlichen Stellen ab. Die violette Farbe erleichtert es den Forschern, die einzelnen Substanzen zu erkennen.

**Unten** Die Aminosäure Prolin katalysiert, anders als andere Reaktionsbeschleuniger, auch chemische Umsetzungen des kleinen Moleküls Acetaldehyd, das hier dargestellt ist.

» Wenn man so etwas überlebt, bekommt man andere Werte. Man lebt, ist gesund, und die Familie ist da. Das allein zählt.



Ein besonders schöner Preis: Mit einem gerahmten Leibniz-Keks spielte Ben Lists Onkel auf den Leibniz-Preis an, den der Chemiker 2016 erhielt.

Kilometer landeinwärts in eine Klinik. Während Paul behandelt wird, tigert Ben List nervös durch die Räume. Und auf einem Bett, ganz hinten, sitzt ein kleiner blonder Junge – es ist Theo. Ein Engländer hatte ihn gefunden und hierher mitgenommen. Er hat nur ein paar kleine Schrammen.

### ORGANISCHE KATALYSATOREN SIND STAND DER TECHNIK

Unfassbar, sie hatten es alle geschafft. „Die Zeit danach war pure Euphorie. Wenn man so etwas überlebt, bekommt man andere Werte“, sagt List. „Man lebt, ist gesund, und die Familie ist da. Das allein zählt.“ Mit der Zeit kam die Normalität zurück. Das Trauma war weg, die Euphorie aber auch. „Was bis heute bleibt, ist die Dankbarkeit in mir, für alles, was ich habe.“ Sechs Monate nach dem Tsunami wird Ben List Max-Planck-Direktor.

Heute liegen auf seinem Schreibtisch Katalysatormoleküle, Modelle aus dem 3-D-Drucker. Prolin wirkt im Vergleich zu den neuesten Katalysatoren aus Lists Labor wie David neben Goliath. „Da man von Prolin relativ große Mengen einsetzen muss, haben wir nach effektiveren Molekülen gesucht.“ Vom neuesten Kandidaten, einem baumartig verzweigten Phosphorsäureester, reicht bereits ein Viertausendstel der Menge, die von Prolin benötigt wird. Und dieser Katalysator beschleunigt Reaktionen, die vorher gar nicht katalysierbar waren!

Organische Katalysatoren sind mittlerweile Stand der Technik. Kaum ein Pharmaunternehmen oder Chemiekonzern, der nicht damit arbeitet. Zahlreiche Medikamente, darunter das HIV-Präparat Darunavir®, werden technisch mithilfe von organischen Katalysatoren wie Prolin hergestellt.

Für Ben List ist das fast schon Geschichte. In Kooperation mit dem Krefelder Textilforschungsinstitut hat er inzwischen weiterentwickelte Katalysatoren mittels UV-Licht chemisch an Nylongewebe gebunden. Aus dem homogenen Katalysator, der wie die Reaktionspartner etwa in einer Flüssigkeit gelöst ist, wird so ein heterogener. Für die Anwendung in der chemischen Produktion hat das enorme Vorteile, weil heterogene Katalysatoren, anders als homogene, nicht aufwendig vom Reaktionsmedium abgetrennt werden müssen. „Wir legen ein Stoffetzchen in das Becherglas, geben die Reaktionslösung dazu und rühren. Anschließend dekantieren wir ab, spülen den Stoff kurz aus und können ihn dann wiederverwenden.“ Und das mindestens 400-mal, wie ein sehr geduldiger Doktorand nebenbei herausfand.

Mit Katalysatoren beschichtete Stoffe sind nicht nur für die Chemieproduktion interessant. „Vorstellbar sind unter anderem Möbelbezüge, Vorhänge oder Teppiche, die sich selbst reinigen, wenn man Wasser draufgibt.“ Waschmittel enthalten schließlich auch Katalysatoren, um Schmutz zu zersetzen. Nur dass diese in großen Mengen im Abwasser verschwinden und den Klärwerken Probleme bereiten. „Fragt sich nur, was die Waschmittelhersteller von unserer Idee halten“, sagt Ben List lachend.

### LIST IST EIN FRÖHLICHER, OFFENER MENSCH

Inzwischen denkt er auch über katalytische Medikamente nach. Katalysatorbestückte monoklonale Antikörper etwa, die an Krebszellen binden und einen ungiftigen Wirkstoff erst direkt am Tumor in ein toxisches Medikament umwandeln. „Auch für andere Bereiche ist die selektive Organokatalyse interessant, etwa in der Duftstoffherstellung oder im Pflanzenschutz.“

Anders als sein Doktorvater, der im Seminar Mitarbeiter, die bei chemischen Denksportaufgaben ins Straucheln kamen, mitunter coram publico abkanzelte (wie sich die Autorin erinnert), gilt Ben List als eher softer Chef. Er hat seine eigene Form der Manöverkritik gefunden. „Ich nenne es das *shit sandwich*“, sagt er schmunzelnd. „Toller Vortrag! Gut gemacht. Unter vier Augen kommt dann der unangenehmere Mittelteil: Dies und jenes könnte besser sein. Und das war Mist! Zuletzt dann die aufbauende Basis: Aber ich glaube, du hast das Talent, und gemeinsam schaffen wir das!“



Gelassen dank einer Grenzerfahrung: Nachdem Ben List und seine Familie im Jahr 2004 den Tsunami in Thailand überlebt haben, weiß der Forscher: Die Karriere und die Auszeichnungen sind toll. Aber es ginge auch ohne.

Ben List ist ein fröhlicher, offener Mensch – ganz bei sich und immer zugewandt. Seine gelassene, positive Ausstrahlung schafft eine kreative Arbeitsatmosphäre. „Nach meiner Erfahrung entsteht Kreativität nicht aus Konzentration und Anspannung heraus. Nur wenn man entspannt ist, können die Gedanken fließen.“ Den Freiraum dafür hat er sich auch physisch geschaffen – durch den Umzug der Abteilung ins neunte Stockwerk des Instituts. Durch eine lange Fensterfront fällt der Blick auf eine weite Landschaft. Links die teils schon musealen Industrieanlagen von Duisburg, im Mittelteil viel Wald um Mülheim und Oberhausen herum. Ganz rechts fängt bereits Essen an und in der Ferne Düsseldorf. Wenn Ben List morgens sein Büro betritt, hat er meist schon Yoga gemacht. Er grinst. „Beim Kopfstand sieht man ja vieles aus einer anderen Perspektive.“

Neben der Sitzgruppe steht eine kleine Buddhafigur, ein Geschenk sei-

ner Frau. Sie ist Symbol der gemeinsamen Liebe zu Asien – erinnert aber auch daran, wie fragil das Leben ist. Die Grenzerfahrung in Thailand sieht Ben List im Rückblick positiv, weil sie ihm verdeutlicht hat, was eigentlich zählt. Die Karriere, die ganzen Auszeichnungen an der Wand hinter dem

Schreibtisch – eine der schönsten ist ein gerahmter Leibniz-Keks mit Glückwünschen seines Onkels –, das ist schon toll. Aber es ginge auch ohne all das. Vielleicht ist es diese Einsicht, die Ben List die innere Freiheit gibt, unbeirrt seinen eigenen Weg zu gehen. Was kann schon passieren? ◀

#### GLOSSAR

**Abzym:** Die Wortschöpfung aus „Antibody“, englisch für Antikörper, und „Enzym“ bezeichnet einen Antikörper, der als Katalysator wirkt.

**Enantiomere** treten immer paarweise auf. Chemisch sind beide Varianten gleich aufgebaut, sie unterscheiden sich allerdings in der räumlichen Anordnung ihrer Molekülteile wie Original und Spiegelbild oder wie die rechte und linke Hand, die sich nicht zur Deckung bringen lassen. Physikalisch und chemisch verhalten sie sich weitgehend gleich, nur mit anderen Enantiomeren reagieren sie unterschiedlich. Die meisten Biomoleküle wie etwa Aminosäuren und Zucker liegen nur in Form eines Enantiomers vor, deshalb wirken Enantiomere physiologisch unterschiedlich.

**Organokatalyse** bezeichnet die selektive Katalyse mit relativ kleinen, rein organischen Molekülen, bei denen ein Metall nicht Teil des Wirkprinzips ist. Bis deren katalytische Wirkung entdeckt wurde, galt die Lehrbuchmeinung, dass sich nur Enzyme und Metallkatalysatoren für die selektive Katalyse eignen.



Algen binden, wie die meisten höheren Pflanzen, Kohlendioxid mit dem Enzym Rubisco. Dieses ist der am häufigsten dafür eingesetzte Biokatalysator, jedoch nicht der effizienteste. Wissenschaftler experimentieren daher mit anderen Enzymen und Stoffwechselwegen, um Kohlendioxid noch wirkungsvoller in organische Moleküle umwandeln zu können.



# Stoffwechsel 2.0

Mehr als 50 Millionen Gene, 40 000 Proteine – für **Tobias Erb** und seine Kollegen vom **Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie** in Marburg war die Auswahl in internationalen Datenbanken gewaltig. Am Ende haben die Wissenschaftler gerade mal 17 Enzyme für den ersten künstlichen Stoffwechselweg herausgepickt, der Kohlendioxid in andere organische Moleküle umwandeln kann. Nun müssen sie zeigen, dass der am Reißbrett entworfene Zyklus auch in einer lebenden Zelle funktioniert.

TEXT **KLAUS WILHELM**

**E**s klingt fast zu schön, um wahr zu sein: eine Maßnahme gegen den Treibhauseffekt, die das überschüssige Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt und daraus auch noch umweltfreundliche Produkte erzeugt. Um rund 30 Prozent sind die Werte in den vergangenen 100 Jahren gestiegen – was maßgeblich dazu beiträgt, dass sich die Erde immer weiter erwärmt. Ein Verfahren, welches das überschüssige Kohlendioxid wieder aus der Atmosphäre entfernt und gleichzeitig noch sinnvoll nutzt, wäre also hochwillkommen.

Tobias Erb treibt aber nicht primär der Kampf gegen den Klimawandel an. Zunächst einmal will der Forscher verstehen, wie sich gasförmiges Kohlendioxid in organische Moleküle umwandeln lässt. „Wenn wir das Treibhausgas dann mit biologischen Methoden als Kohlenstoffquelle erschließen und dabei aus der Atmosphäre entfernen könnten, so wäre das natürlich ein toller Nebeneffekt“, sagt der Max-Planck-Forscher.

Erb studierte Biologie und Chemie und wollte schon früh wissen, wie das Leben im Kleinen tickt: „Mich hat immer schon interessiert, wie so winzige Lebewesen wie Bakterien Dinge voll-

bringen, die für Chemiker bis heute unerreichbar sind“, sagt er. Die ersten Jahre seines jungen Forscherdaseins verbrachte er denn auch mit den Enzymen von Bakterien. Diese Proteine fungieren als Biokatalysatoren, die chemische Reaktionen anfangen, beschleunigen oder beenden.

## ALTERNATIVE ZU RUBISCO

Schon in seiner Doktorarbeit wandte sich Tobias Erb dabei dem Kohlenstoffkreislauf zu – dem Vorgang, bei dem das Kohlendioxid der Atmosphäre in unterschiedliche Zuckerverbindungen umgewandelt wird. Dabei entdeckte er in einem Purpurbakterium ein Enzym mit dem schwer auszusprechenden Namen Crotonyl-CoA Carboxylase/Reductase (CCR). Dieses schleust Kohlendioxidmoleküle in den Stoffwechsel des Bakteriums ein.

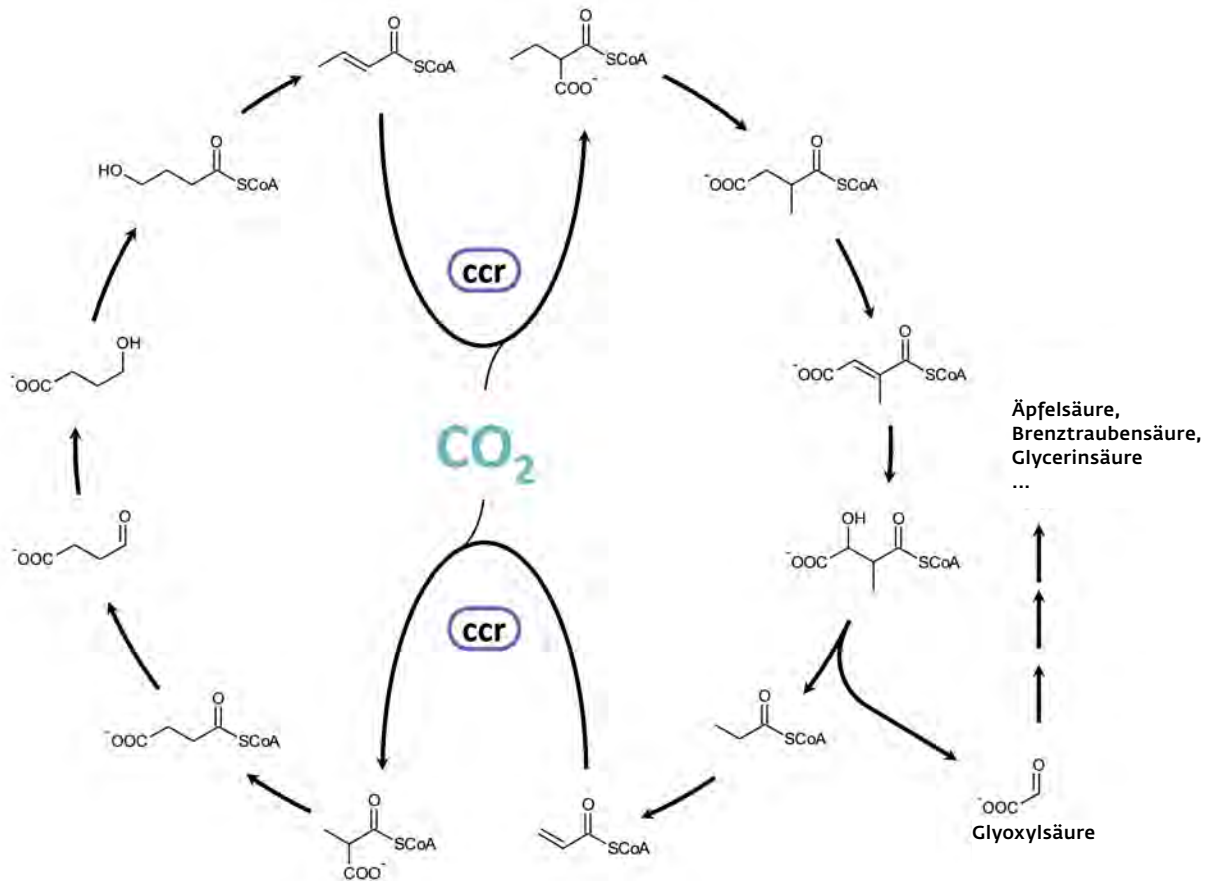
Neben den Bakterien sind Pflanzen die Hauptnutznießer dieses als Kohlendioxidfixierung bekannten Vorgangs: Bei der Fotosynthese produzieren Pflanzen mit dem Licht der Sonne als Energiequelle aus dem Kohlendioxid der Atmosphäre Zucker. Dazu verwenden Pflanzen einen Stoffwechselweg, den

sogenannten Calvin-Zyklus, der mit all seinen daran beteiligten Enzymen in jedem Biologie-Schulbuch steht. Der Calvin-Zyklus ist für das Leben auf der Erde unverzichtbar, denn durch ihn produzieren Pflanzen für Organismen lebenswichtige kohlenstoffhaltige Moleküle.

Lange Zeit galt der Calvin-Zyklus als einziger Stoffwechselweg der Kohlendioxidfixierung. „Inzwischen kennen wir aber ein gutes halbes Dutzend weitere“, erklärt Erb, „mehr als ein Drittel des Kohlendioxids auf diesem Planeten wird von Kleinstlebewesen gebunden.“ Die Natur hat also unterschiedliche Lösungen für dasselbe Problem erdnen. Sie alle funktionieren, aber keine ist perfekt.

Ein Beispiel: Das Kohlendioxidbindende Enzym des Calvin-Zyklus heißt Rubisco. Für Erb ist es das „am meisten unterschätzte, weil häufigste Enzym auf unserem Planeten“. Auf jeden Menschen kommen etwa fünf Kilogramm Rubisco. Aus dem Kohlendioxid, das im Volumen eines gewöhnlichen Wohnzimmers vorhanden ist, kann das Enzym eine Prise Zucker produzieren.

Dennoch arbeitet Rubisco eigentlich vergleichsweise langsam und ziem-



lich nachlässig: Bei jeder fünften Reaktion schnappt sich das Enzym irrtümlicherweise statt ein Kohlendioxid- ein Sauerstoffmolekül. Die Pflanzen können sich ein derlei liederliches Vorgehen leisten, haben sie doch meistens ausreichend Licht und damit Energie zur Verfügung.

Das von Erb entdeckte Enzym CCR dagegen agiert, als hätte es einen Turbo eingeschaltet: 20-mal schneller als das pflanzliche Rubisco. Insgesamt fixiert es Kohlendioxid zwei- bis dreimal so effizient. Nicht zuletzt, weil sich dieses Enzym so gut wie nie irrt. „CCR katalysiert die effizienteste Reaktion zur Kohlendioxidfixierung, die wir bis heute kennen“, sagt der Biologe. Für die Bakterien ist das auch unerlässlich, denn sie haben oft weniger Energie zur Verfügung.

Erb und seine Kollegen wollen aber nicht nur entschlüsseln, wie CCR arbeitet und was seine erstaunlichen Fähigkeiten ausmacht. Sie wollen das Enzym auch dazu einsetzen, den Kohlenstoffkreislauf im Labor nachzubauen und dessen Fähigkeiten nutzen. „Die Herausforderung für uns Biologen besteht heute darin, aus dem Unbelebten Abläufe des Lebens nachzubilden“, erklärt der Forscher.

Dies haben sich auch andere Wissenschaftler zum Ziel gesetzt. „Bisher haben wir Biologen, ähnlich wie die analytischen Chemiker im 18. Jahrhundert, versucht, die komplexen Abläufe in der Natur in einzelne Bausteine zu zerlegen und so zu entschlüsseln. Aber erst wenn wir einen biologischen Vorgang aus Grundbausteinen nachstellen können, haben wir tatsächlich verstanden, wie er funktioniert“, sagt Tobias Erb.

### LEBEN AUS DER PETRISCHALE

Seit sich das Erbgut beliebiger Organismen entziffern und verändern und sich künstliche Versionen von Genen kreieren lassen, ist die Biologie in eine neue Phase getreten: die Phase des Schaffens und Bauens. Das Zauberwort heißt Synthetische Biologie. Wissenschaftler auf diesem Gebiet wollen Zellen erschaffen, die sie zu neuen Funktionen programmieren können. Einer der Pioniere dieser Fachrichtung ist Craig Venter. Sein Ansatz: alle Bauteile aus lebenden Zellen zu entfernen, die nicht unbedingt zum Überleben notwendig sind, um damit eine Minimalzelle zu erschaffen, die dann mit neuen Eigenschaften ausgestattet werden kann.

Dazu hat der US-Amerikaner bereits das minimale Erbgut eines Bakteriums im Labor synthetisiert und in eine leere Zellhülle eingesetzt.

In Deutschland soll ein im Jahr 2014 gestartetes Projekt der Max-Planck-Gesellschaft und des Bundesforschungsministeriums die Synthetische Biologie voranbringen. Daran beteiligt sind Gruppen von neun Max-Planck-Instituten sowie der Universität Erlangen-Nürnberg. Im Gegensatz zu vielen anderen Projekten der Synthetischen Biologie wollen die Wissenschaftler eine Minimalzelle aus den einzelnen Komponenten neu konstruieren.

Durch diesen Ansatz könnten eines Tages künstliche Zellen mit speziell zusammengestellten Stoffwechselwegen entstehen, die etwa Medikamente, Impfstoffe oder Biokraftstoffe herstellen – und dazu zum Beispiel das Kohlendioxid aus der Atmosphäre verwenden.

Zurück ins Labor von Erb und seinem Team. Dort öffnet Thomas Schwander den Gefrierschrank und holt ein ganzes Sortiment kleiner Gefäße heraus – jedes etwa halb so groß wie ein USB-Stick. Darin ruht eine kleine wissenschaftliche Sensation: jene Stoffe und Enzyme, die zusammen einen

**Linke Seite** Im CETCH-Zyklus ist für jede Reaktion ein bestimmtes Enzym zuständig. Die Crotonyl-CoA Carboxylase/Reductase (CCR) beispielsweise ermöglicht die beiden Reaktionen zur Kohlendioxidfixierung.

**Diese Seite, oben** Zusammen mit Tobias Erb untersucht Nina Cortina den CETCH-Zyklus. Die philippinische Wissenschaftlerin ist Expertin für Massenspektrometrie. Im Vordergrund ein Fotospektrometer, mit dem Enzymmessungen durchgeführt werden.

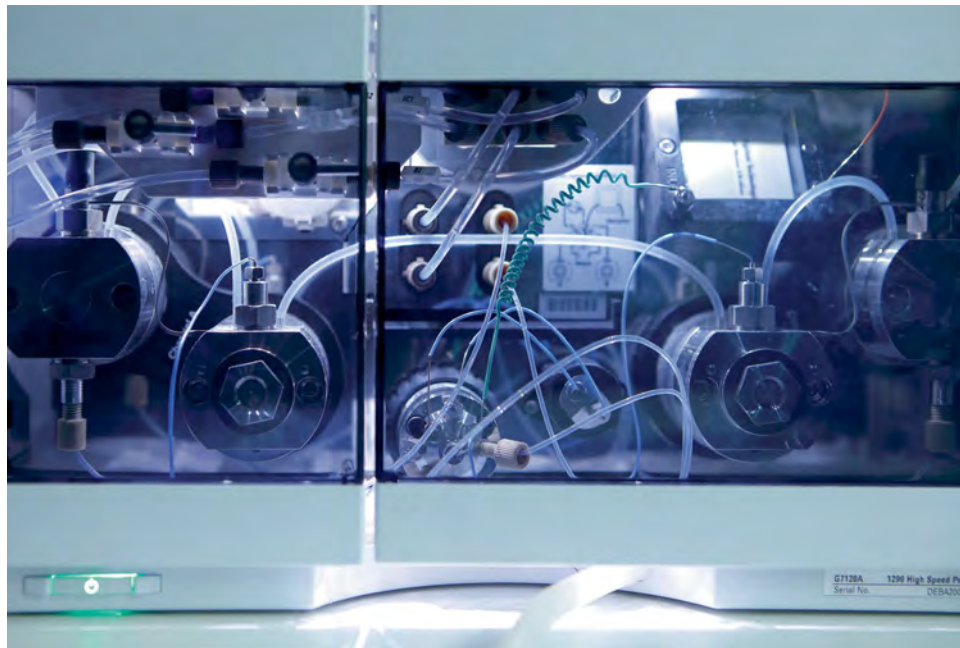
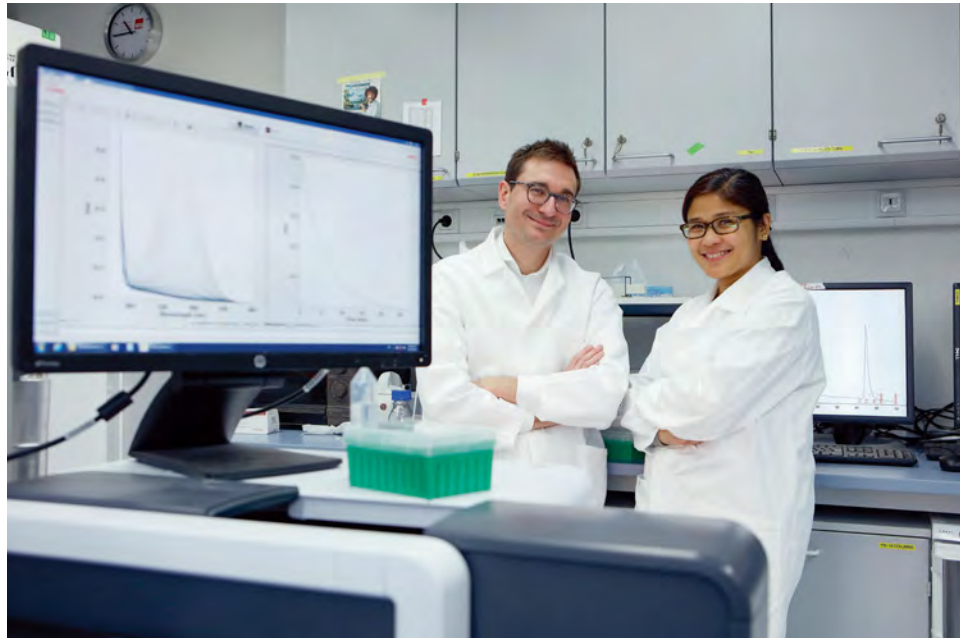
**Diese Seite, unten** Mit solchen Massenspektrometrie-Instrumenten analysieren die Forscher die Reaktionsprodukte des CETCH-Zyklus.

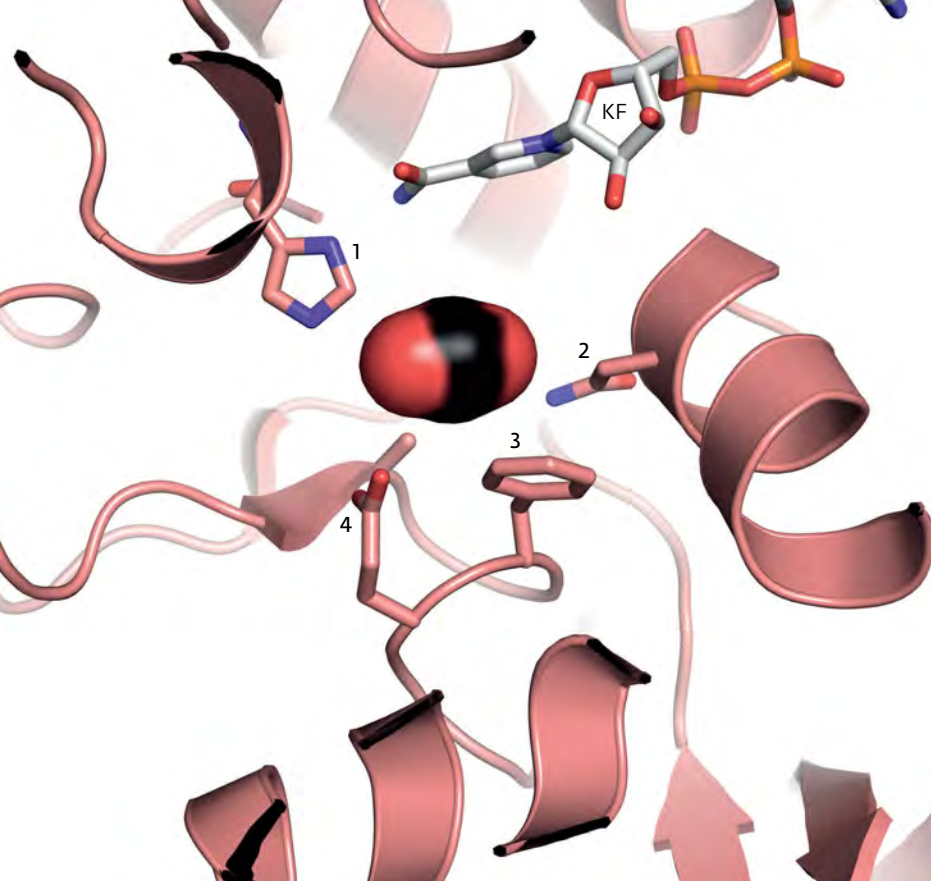
komplett neuen Stoffwechselweg zur Kohlendioxidfixierung ergeben.

Tobias Erb hatte 2011 – damals noch an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich – den auf den Namen CETCH getauften Zyklus in nur zwei Wochen mit sämtlichen biochemischen Reaktionen skizziert. Er nutzte dazu einerseits sein Wissen über den Kohlendioxidstoffwechsel als auch internationale Datenbanken, in denen mehr als 50 Millionen Gene und mehr als 40 000 Enzyme mit ihren jeweiligen Funktionen gespeichert sind.

Daraus hat Erb mehrere Dutzend Kandidaten gewählt, die zusammen mit dem Turbo-Enzym CCR in seinem künstlichen Zyklus die gewünschten Aufgaben erfüllen könnten: „Nachdem wir uns so lange mit der natürlichen Kohlendioxidfixierung beschäftigt hatten, war ich überzeugt, dass unser Designer-Stoffwechsel sich auch in die Praxis umsetzen lassen würde.“

Noch vor seinem Wechsel von Zürich nach Marburg an das Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie stellte Erb ein Team zusammen, „ohne Hierarchien und mit begabten Forschern, die sich wissenschaftlich austoben wollen“. Mit Leidenschaft und viel





**Links** Aktives Zentrum des CCR-Enzyms (rosa Linien und Bänder; KF: Kofaktor NADPH); Die Position des eiförmigen Kohlendioxidmoleküls in der Mitte wurde am Computer modelliert. Die für die Positionierung des Kohlendioxids wichtigen Aminosäuren sind vergrößert dargestellt: Histidin (1), Asparagin (2), Phenylalanin (3) und Glutamat (4).

**Rechts** Den CETCH-Zyklus hat Erb zunächst am Rechner konzipiert und später zusammen mit seinem Team im Labor getestet. Das Ergebnis: der erste künstliche Stoffwechselweg zur Kohlendioxidfixierung.

Know-how haben sie in einer Rekordzeit von zwei Jahren die Pläne am Reißbrett Wahrheit werden lassen.

Die Wissenschaftler testeten dabei die Funktionstüchtigkeit neuer Enzymkandidaten, veränderten sie und probierten so lange neue Kombinationen aus, bis diese optimal zusammenarbeiteten. „Das war trotz aller Labortechnik immer noch viel Handarbeit“, berichtet Thomas Schwander. „Immer wieder mussten wir neue Hürden überwinden.“ So konnten die Forscher den Zyklus lange Zeit nicht recht in Schwung bringen, da eines der Enzyme nur zusammen mit einer eisenhaltigen Verbindung funktionierte. Diese ließ jedoch die anderen Proteine ausflocken. Das Enzym musste also zunächst so verändert werden, dass es mit dem besser verträglichen Sauerstoff arbeiten kann.

Eine weitere Schwierigkeit lag darin, dass der Zyklus zu Beginn viele Fehlreaktionen aufwies. Dadurch arbeitete er nur langsam und kam schnell ins Stocken. Erst als die Wissenschaftler zum ursprünglichen Zyklus noch weitere Enzyme hinzugaben, konnten sie die Fehlreaktionen korrigieren. Der Trick dabei: Diese zusätzlichen Enzyme funktionieren als Recyclingkräfte, welche die Fehler der andern beseitigen. Tobias Erb ver-

mutet, dass solche Korrekturschleifen auch in natürlichen Stoffwechselwegen wichtig sein könnten.

Allen Schwierigkeiten zum Trotz: Am Ende ist es den Forschern gelungen, den ersten von Menschenhand geschaffenen Stoffwechselweg zur Kohlendioxidfixierung zusammenzufügen. Beteiligt sind daran 17 Enzyme aus neun verschiedenen Organismen – vom einfachen Bodenbakterium bis hin zum Menschen. Darunter sind auch drei Designer-Enzyme, welche die Wissenschaftler aus bereits existierenden mithilfe des Computers so umgebaut haben, dass sie genauer arbeiten oder andere Reaktionen katalysieren.

### ROHSTOFFE AUF WUNSCH

Die Enzyme sind also natürlichen Ursprungs, ihre Kombination zu einem neuartigen, hocheffizienten Stoffwechselweg kommt aber in der Natur nicht vor. „Vermutlich hatten die jeweiligen Enzyme in der Natur im Laufe der Evolution nie die Möglichkeit zusammenzukommen“, sagt Schwander. In Erbs Kohlendioxidzyklus entsteht am Ende eine Verbindung namens Glyoxylsäure. Der Kreislauf kann aber so verändert werden, dass sich stattdessen auch Roh-

stoffe für Biodiesel oder andere organische Stoffe bilden.

Für die Kohlendioxidfixierung wird Energie benötigt. Der CETCH-Zyklus wird von chemischer Energie angetrieben, genauer gesagt: von Elektronen. Der Calvin-Zyklus der Fotosynthese arbeitet mit der Energie des Sonnenlichts, die er dann in chemische Energie verwandelt. Die Forscher können also vergleichen, welcher Prozess effizienter ist: Während der CETCH-Zyklus nur 24 bis 28 Lichtquanten für die Bindung eines Kohlendioxidmoleküls verbrauchen würde, sind es bei der natürlichen Fotosynthese bis zu 34. „Wir könnten also mit derselben Lichtenergie rund 20 Prozent mehr Kohlendioxid binden“, sagt Erb.

Und das ist noch nicht mal die Obergrenze: Erbs Team arbeitet bereits an der Entwicklung noch sparsamerer Kohlendioxidzyklen. Diese könnten in Zukunft vielleicht an Solarzellen gekoppelt werden und die Elektronen, die diese aus der Lichtenergie produzieren, direkt zur Umwandlung von Kohlendioxid verwenden. Technisch erscheinen derlei Visionen nicht mehr unmöglich. So arbeiten die Forscher im MaxSynBio-Netzwerk intensiv daran, Prozesse an der Schnittstelle von Chemie, Materialwissenschaften und Biologie zu ermöglichen.



Ganz im Sinne der Synthetischen Biologie könnte der CETCH-Zyklus auch helfen, die natürliche Fotosynthese zu verbessern. Zunächst müssten die Gene für die Enzyme des CETCH-Zyklus dann allerdings in eine lebende Zelle – ein Bakterium, eine Alge oder Pflanzen – eingebaut werden, die dann das jeweils gewünschte Produkt herstellen würde.

Die Marburger Wissenschaftler wollen daher als Nächstes Bakterien dazu bringen, die CETCH-Gene in ihrem Sinne zu nutzen. „Wir können nicht vorhersagen, wie sich unser Zyklus aus 17 Reaktionen in einer Zelle verhalten wird, in der 3000 verschiedene Reaktionen gleichzeitig ablaufen. Da liegt noch Arbeit für einige Jahre vor uns“, sagt Tobias Erb.

Vielleicht landet das Biomodul des CETCH-Zyklus aber auch in Craig Venter's Minimalzelle. Oder, noch besser, in einer künstlichen Zelle, die im Zuge des MaxSynBio-Netzwerks entstehen soll. In jedem Fall wird es noch etwas dauern, bis Erbs Traum in Erfüllung geht: „Mit maßgeschneiderten Enzymen einen künstlichen Stoffwechsel 2.0 zu erschaffen, der jede beliebige organische Verbindung aus Kohlendioxid herstellen kann.“

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Das Kohlendioxid-bindende pflanzliche Enzym Rubisco arbeitet nur langsam und macht dabei regelmäßig Fehler. Das bakterielle Enzym Crotonyl-CoA Carboxylase/Reductase (CCR) ist im Vergleich dazu rund 20-mal schneller und exakter.
- Zusammen mit 16 weiteren Enzymen lässt sich das Enzym CCR im Reagenzglas zum CETCH-Stoffwechselweg zusammenfügen. Der künstliche Zyklus wandelt Kohlendioxid effektiver um als der von Pflanzen genutzte Calvin-Zyklus.
- Bakterien oder Pflanzen könnten mit dem CETCH-Zyklus eines Tages überschüssiges Kohlendioxid in der Atmosphäre binden und in nützliche organische Substanzen umwandeln.

### GLOSSAR

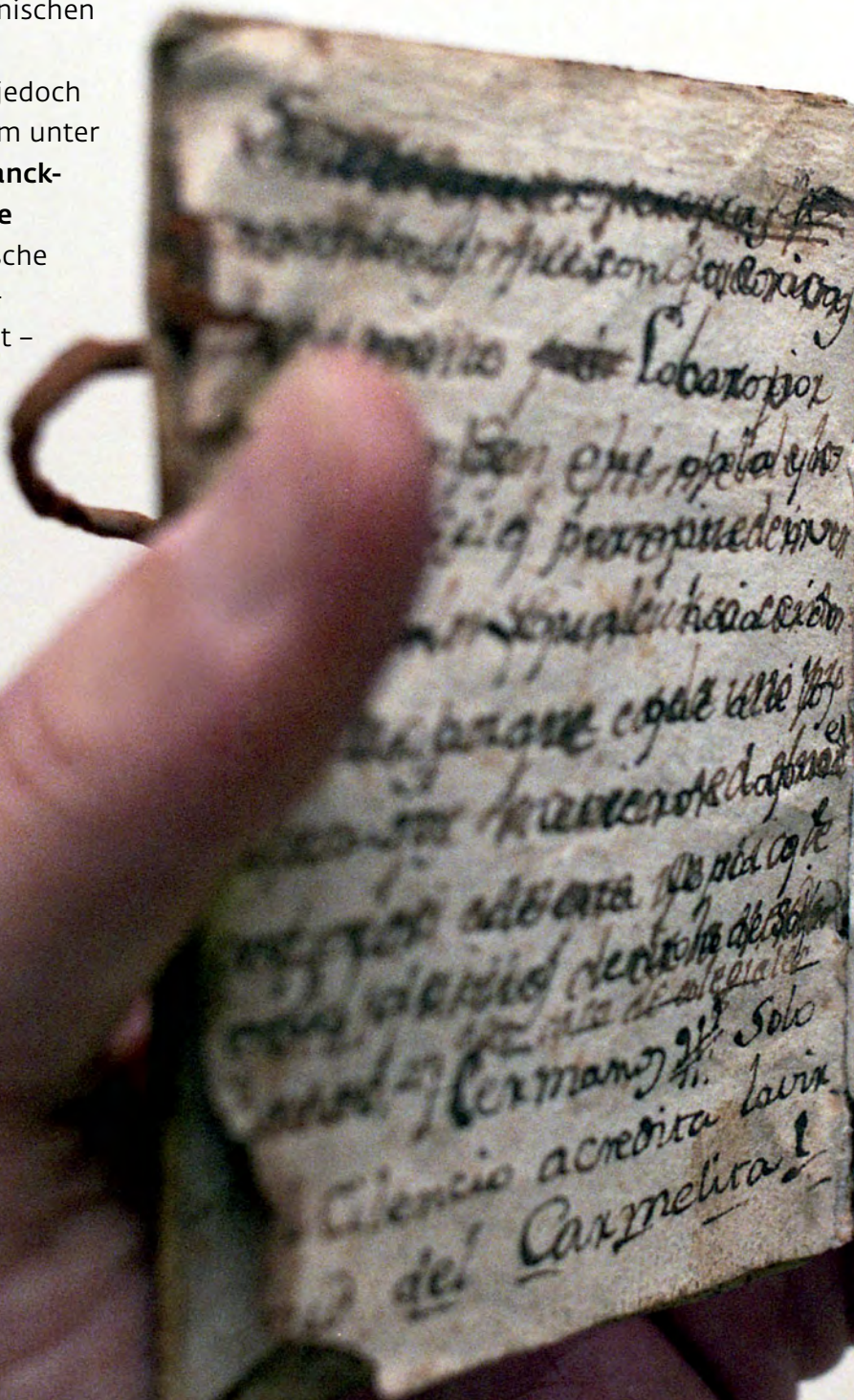
**Calvin-Zyklus:** Stoffwechselweg von Pflanzen, bei dem Kohlendioxid aus der Atmosphäre in Zuckermoleküle umgewandelt wird. Der Zyklus nutzt ATP als Energiequelle. Das Enzym Rubisco ermöglicht die Anlagerung von Kohlendioxid an den Zucker Ribulose-1,5-Bisphosphat (Kohlendioxidfixierung). Damit ein Zuckermolekül hergestellt werden kann, muss der Zyklus dreimal durchlaufen und müssen drei Kohlendioxidmoleküle fixiert werden. Die für den Calvin-Zyklus notwendige chemische Energie wird von der Lichtreaktion der Fotosynthese zur Verfügung gestellt.

**Synthetische Biologie:** Junges Forschungsfeld mit dem Ziel, biologische Systeme zu entwickeln, die in der Natur so nicht vorkommen. Ein erster Schritt ist dabei die Konstruktion einer möglichst einfachen Zelle mit einem Erbgut, welches nur die für das Überleben der Zelle absolut notwendigen Informationen enthält. Hierzu gibt es zwei entgegengesetzte Ansätze: Manche Forscher wollen die Komplexität existierender Zellen bis zum essenziell Notwendigen verringern (Top-down-Ansatz), andere wollen die für das Überleben einer Zelle absolut notwendigen Bausteine identifizieren und aus diesen neue Zellen aufbauen (Bottom-up-Ansatz). Auf diese Weise sollen bestehende biotechnologische Verfahren vereinfacht werden. Aber auch völlig neuartige Produkte wie Impfstoffe, Medikamente oder Diagnostika, Biotreibstoffe und maßgeschneiderte Werkstoffe könnten sich mithilfe der Synthetischen Biologie entwerfen lassen.

# Herrschen mit Handbuch und Bildstock

Die Eroberung der Neuen Welt fiel den spanischen Konquistadoren überraschend leicht. Mit Gewalt und Grausamkeit allein ließen sich jedoch die Gebiete nicht regieren. Ein Forscherteam unter der Leitung von **Thomas Duve** am **Max-Planck-Institut für europäische Rechtsgeschichte** untersucht, mit welchen Medien die spanische Krone ihre Herrschaft festigte. Wie bedeutsam Bilder für die Konsolidierung von Recht – auch im alten Europa – waren, ergründet eine Gruppe unter **Carolin Behrmann** am **Kunsthistorischen Institut** in Florenz.

Handlich und praxisnah:  
Handbüchlein wie dieses  
Gebetbuch unterstützten  
Priester und Mönche in  
der Neuen Welt bei der  
Christianisierung und zu-  
gleich bei der Etablierung  
des neuen Rechtssystems.



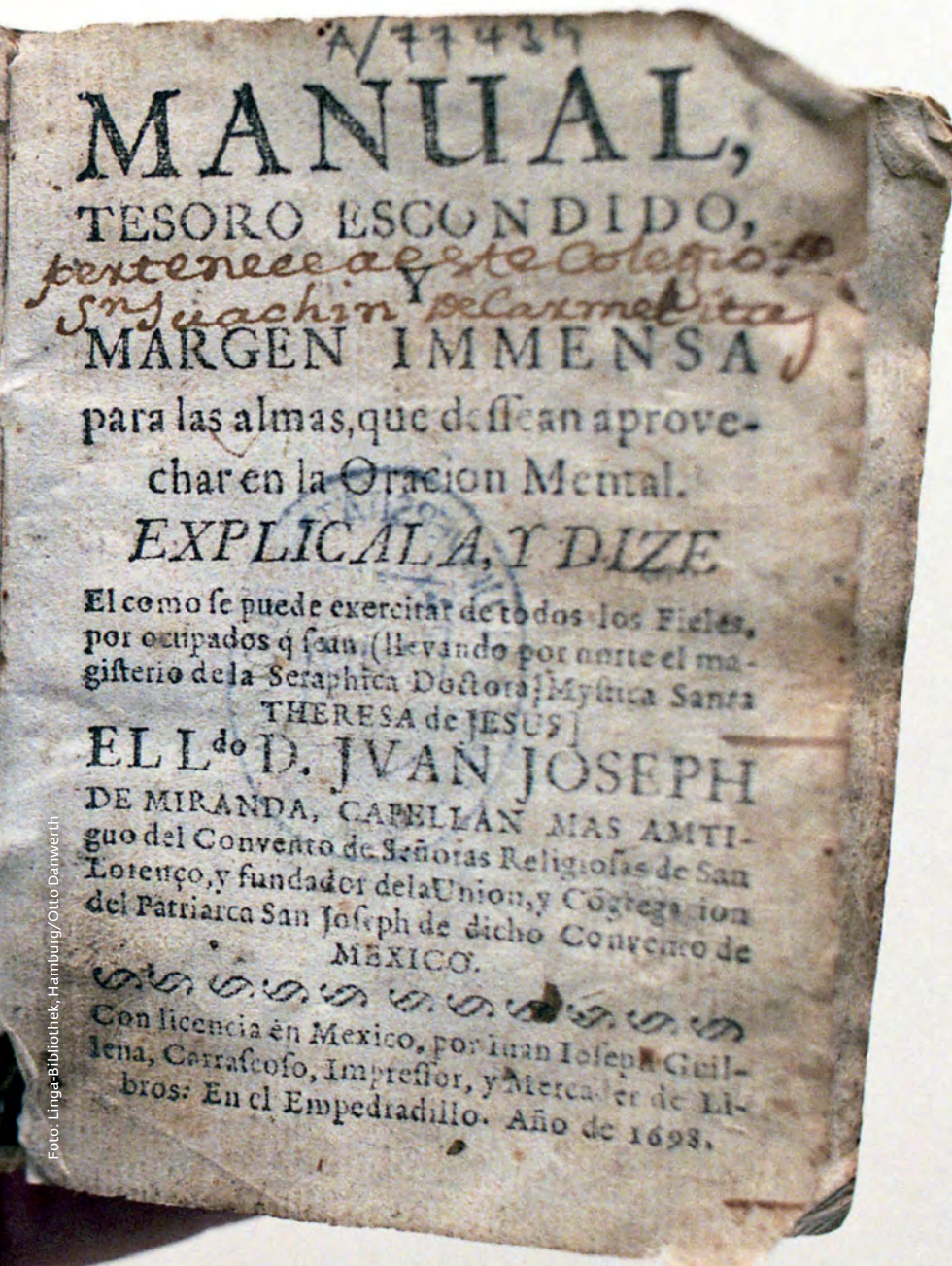


Foto: Linga-Bibliothek, Hamburg/Otto Danwerth

TEXT MICHAELA HUTTERER

Im Jahr 1552 hebt der portugiesische Drucker João de Barreira die Bögen eines kleinen Buches aus seiner Druckerpresse in Coimbra. 1000 Seiten im handlichen Oktavformat, die er später in schlichtes Ziegenleder einschlagen wird. *Manual de Confessores y Penitentes* prangt auf der ersten Seite. Geschrieben hat dieses *Handbuch für Beichtväter und Büsser* Martín de Azpilcueta, einer der führenden Kirchenrechtler und Moralthologen seiner Zeit. Azpilcueta oder Dr. Navarro, wie er aufgrund seiner Herkunft genannt wird, ist ein Mann der Klarheit und Gelehrsamkeit, ein Spätscholastiker, Mitglied der angesehenen Schule von Salamanca und europaweit eine Autorität. Über 50 Schriften aus seiner Feder beschäftigen sich mit katholischem Kirchenrecht, Moralthologie, Strafrecht und Wirtschaftstheorien – Großformatiges für den akademischen Gebrauch.

Was hatte den Professor für Kanonistik bewogen, sein Wissen für Praktiker, noch dazu im Taschenbuchformat, auf den Markt zu bringen? Konnte er ahnen, dass gerade dieses Werk zu einem der wichtigsten Ratgeber in juristischen Alltagsfragen werden würde – in Spanien und jenseits des Atlantiks, in der Neuen Welt?

#### BESTSELLER IN DER NEUEN WELT

„Kaum ein Buch wurde in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts öfter gedruckt, übersetzt und zusammengefasst als Azpilcuetas Beichtmanual“, berichtet Thomas Duve, Direktor am Max-Planck-Institut für europäische Rechtsgeschichte in Frankfurt. „Und kaum eines war in der Neuen Welt weiter verbreitet.“ Ein

» Die Kirchenleute in der Neuen Welt verstanden es, indigene Glaubens- und Lebenskontexte in den katholischen Glauben zu integrieren.



David Rex Galindo, Otto Danwerth, Manuela Bragagnolo und Projektleiter Thomas Duve (von links) erforschen gemeinsam, welche Rolle einfache Kirchenleute bei der Festigung der spanischen Herrschaft in Mittel- und Südamerika spielten.

Bestseller also. Mehr als 80 Ausgaben hat Duves Team, bestehend aus Manuela Bragagnolo, Otto Danwerth und David Rex Galindo, bislang in Archiven und Bibliotheken in Süd- und Mittelamerika ebenso wie in Europa gefunden. Im Fokus der mit einem Frankfurter Sonderforschungsbereich kooperierenden Wissenschaftler steht die Frage, wie es der spanischen Krone gelang, ihren Untertanen in Übersee nach der Eroberung die Befolgung von Normen beizubringen. Wie entstand das, was Juristen einen Rechtsraum nennen? Welche Rechtsquellen und Medien waren für eine solche Verhaltenssteuerung bedeutsam?

Studien zu Buchproduktion, Buchbesitz und -zirkulation belegen, dass Amtsschreiber, Stadtbere, Priester und Bischöfe lieber schmale Kompendien zurate zogen als dicke Schmöker. In den Klöstern und Amtsstuben der Neuen

Welt finden sich im 16. und 17. Jahrhundert weitaus weniger offizielle Gesetzestexte als Zusammenfassungen, Kommentare, Breviarien und sogenannte Epitomen: oft bis zur Tabelle komprimierte Exzerpte bedeutender moraltheologischer oder kirchenrechtlicher Werke.

Für die Gruppe um Duve sind gerade diese „pragmatischen“ Schriften und das Vorgehen der *pragmatici*, also der Halbgelehrten, die sich darauf berufen, besonders spannend. „Als Rechtshistoriker wollen wir verstehen, wie eine relativ kleine Gruppe von Besitzern weite Landstriche mit hoch entwickelter Bevölkerung beherrschen konnte – ganz unabhängig davon, wie wir diesen Vorgang aus heutiger Perspektive bewerten. Dazu müssen wir all jenen Zeugnissen Beachtung schenken, die einen Einblick in den Alltag und seine juristischen Probleme gewähren“, erklärt

Duve seinen Forschungsansatz. Er rekonstruiert, wie sich eine neue normative Ordnung herausbilden konnte. Dabei interessiert sich das Team nicht nur für juristische Hochliteratur, sondern auch für Werke, die von der traditionellen rechtshistorischen Forschung meist gering geschätzt werden. Werke, die erst über historische Importpapiere, Inventarlisten von Buchbesitzern oder Bibliotheksverzeichnisse als wichtige Quellen greifbar werden. Diese Aufzeichnungen stammen aus der Zeit, kurz nachdem die berühmt-berüchtigten Konquistadoren Hernán Cortés und Francisco Pizarro die Imperien der Azteken und Inka unterworfen hatten. Die bisherigen Zentren der Macht waren zerstört, auf ihren Mauern wurden spanische Städte und Siedlungen gegründet. König Philipp II. von Spanien erließ 1573 mit seinen *Ordenanzas de descubrimiento, nueva población y pacificación de las Indias* so etwas wie ein Urbanisierungsprogramm. Zu diesem Zeitpunkt existierten bereits 250 Städte. Schwierigkeiten bereiteten die ländlichen Gebiete. Wie ließ sich in Grenzregionen, in denen es kaum offizielle Ordnungshüter gab, ein gemeinsamer Verhaltenskodex etablieren, an den sich Siedler und Ureinwohner hielten?

„Die Kirche war von entscheidender Bedeutung“, erklärt der Rechtshistoriker Duve. Sie unterstützte die Verwaltungseinheiten und gründete Klöster, Kirchen und Schulen. Zwischen 1511 und 1620 entstanden mehr als 30 Bistümer. Ohne diese Unterstützung hätte die auf Gewalt und Gesetz gestützte Kolonisation nicht Bestand haben können. Die Zahl der Ordensleute, die im 16. Jahrhundert nach Amerika gelangten, überstieg mit 5400 bei Weitem die Zahl der königlichen Verwaltungsbeamten.

Es waren Franziskaner, Dominikaner und Jesuiten, die Land und Leute studierten, die indigenen Sprachen erlernten und auf dieser Basis den katholischen Glauben mit seinen Werten und

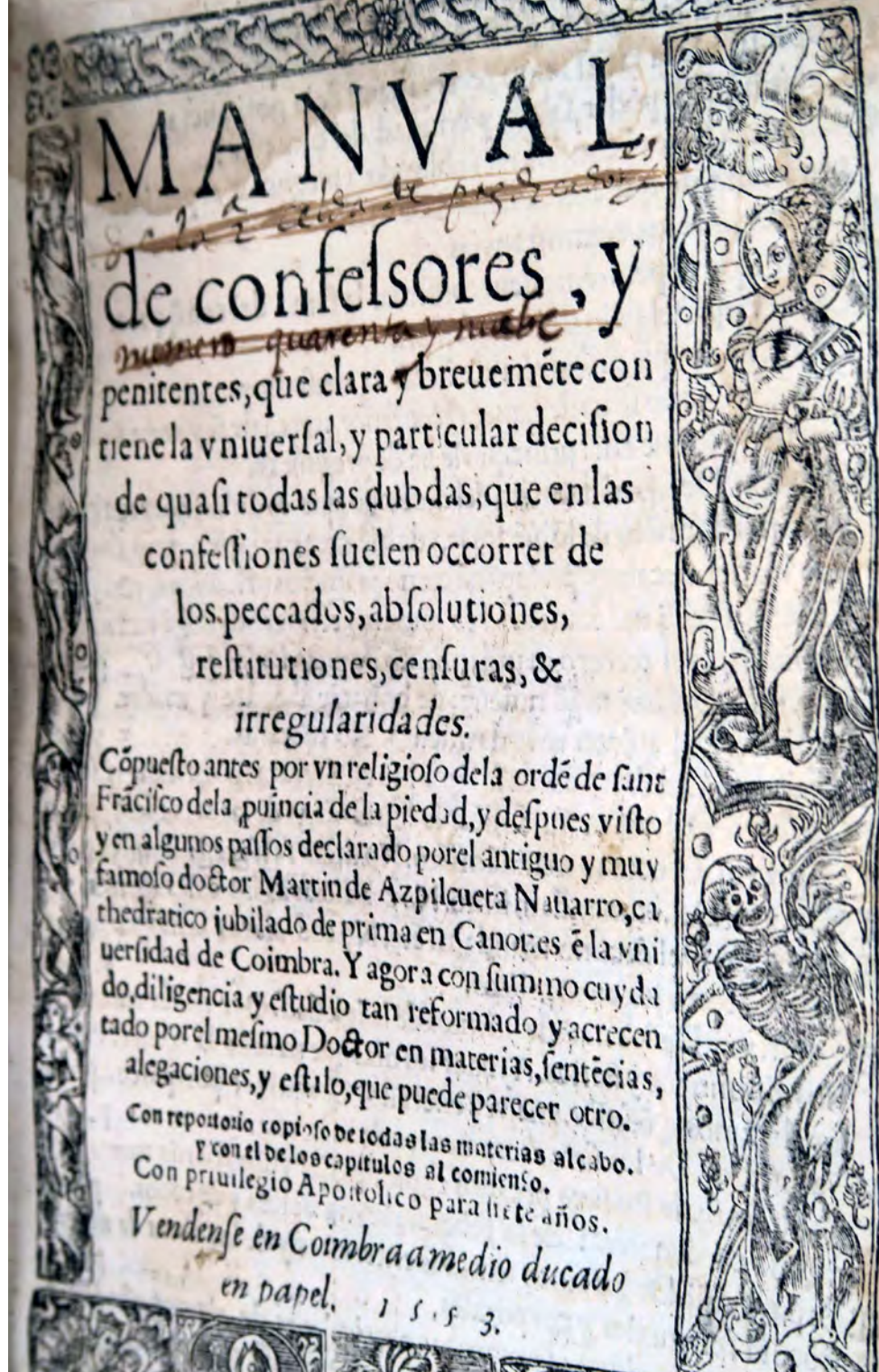


Verhaltensregeln etablierten. Sie vermittelten die Grundlagen eines gemeinsamen Miteinanders – im Namen des Herrn und im Auftrag des Königs. Laut einem Kommentar zu den *Siete Partidas*, dem wichtigsten Gesetzeswerk der spanischen Krone, war es den Bischöfen unter bestimmten Umständen erlaubt, auch in weltlichen Dingen Recht zu sprechen. „Unter Berufung auf Normen der mittelalterlichen Papstkirche reklamierten Kirchenangehörige ihre jurisdiktionelle Zuständigkeit für die indigene Bevölkerung. Diese fiel damit ähnlich wie Witwen, Waisen, Arme und Kranke unter ihren Schutz“, erklärt Duve.

#### REGELN FÜR PREISGESTALTUNG UND FINANZGESCHÄFTE

Kleriker setzten Recht – nicht nur auf Konzilien, sondern auch durch ihre Büchlein und Handreichungen. „Wir gehen davon aus, dass diese Art normativer Literatur moraltheologischer Provenienz entscheidend dazu beitrug, koloniale Herrschaftsstrukturen und ihre normative Ordnung zu etablieren und Rechtsräume zu konstituieren“, sagt Duve. So entstand in der Neuen Welt ein Raum, der auf den christlich-katholischen Werten und Gesetzen der Alten Welt basierte, diese fortentwickelte und alsbald eigene normative Quellen hervorbrachte.

Das mag auch erklären, warum Azpilcuetas kleines Beichthandbuch so beliebt war. Otto Danwerth, der immer wieder auf Spurensuche nach pragmatischer Literatur geht, hat es eingehend analysiert: „Es enthält viele Themen, die man vielleicht nicht in so einem Werk erwarten würde.“ So finden sich darin Normen über verschiedene Typen von Verträgen oder über angemessene Preise. Fragen zur Besteuerung oder Wucher erörtert Azpilcueta im Kapitel zum 7. Gebot, „Du sollst nicht stehlen“. Auch Fragen des Ehe-, Familien- oder Erbrechts finden Eingang in das Manual.



Bestseller: Das Handbuch für Beichtväter und Büßer von Martín de Azpilcueta, einem einflussreichen Kirchenrechtler des 16. Jahrhunderts, gehörte zu den wichtigsten Ratgebern in juristischen Alltagsfragen.

Azpilcuetas Stärke liegt in seiner Fähigkeit, komplexe juristische Zusammenhänge lebensnah und einfach zu erklären. „Klar gegliedert und in verständlicher Sprache bot er auch Lösungen für die akuten Probleme im Wirtschaftsleben und für Finanzierungsgeschäfte in der Neuen Welt – so etwa nach der Entdeckung bedeutender Silberminen in mexikanischen Zacatecas und im

hochperuanischen Potosí“, erklärt Danwerth. Kein Wunder, dass vom Amtschreiber bis zum hohen Beamten und vom einfachen Missionar bis hin zum Bischof schon bald viele koloniale Repräsentanten eine Ausgabe im Schrank führten. Dabei war Azpilcueta selbst nie in Amerika gewesen. Der Professor ließ sich aber von seinen Schülern, Bekannten und von seinem missionierenden



Neffen aus den spanischen und portugiesischen Kolonien per Brief berichten.

Doch Azpilcueta war nicht der Einzige, der sich auf das Verfassen verständlicher Texte verstand. Zu jener Zeit entstanden viele Werke, Traktate und Manuskripte – meist, um indigenen „Neuchristen“ den Glauben zu vermitteln. Der Franziskaner Alonso de Molina etwa, der schon als Kind in den Straßen von Mexiko-Stadt Nahuatl erlernte, die Sprache der Azteken, verfasste nicht nur das erste Wörterbuch für die Verständigung mit der indigenen Bevölkerung. Er schrieb zudem ein Beichthandbuch. Auch de Molina richtete sich an spanischsprachige Geistliche, bot ihnen aber zugleich – und das ist besonders – Übersetzungen auf Nahuatl. Und er setzte auf eindrucksvolle Illustrationen, die die Geistlichen den Indios zeigen konnten. Wo Sprache fehlte, half das Bild.

Mit der Bedeutung der Bilder im und für das Recht setzt sich auch Carolin Behrmann vom Kunsthistorischen Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Florenz auseinander. „Das Recht in seiner Gesamtheit lässt sich nicht allein durch Worte vermitteln, sondern benötigt Objekte, Zeichen und Artefakte“, erklärt die Leiterin der Forschungsgruppe „Nomos der Bilder“. Zusammen mit einer internationalen Gruppe von Doktoranden untersucht sie, welche Bilder vom Spätmittelalter bis in das 21. Jahrhundert Rechtspraxis und Rechtsidee visualisieren und mitbestimmen können.

Ihre Forschung über die Bild- und Zeichentheorie der spanischen Spätscholastik des 16. Jahrhunderts nimmt die Bedeutung der Bildtheologie in den Blick und stellt sich ähnlichen Fragen wie die Frankfurter Rechtshistoriker. Doch beschränkt sich der zeitliche Rahmen des Nomos-Projekts nicht auf die

Gruppenleiterin Carolin Behrmann und Felix Jäger, Doktorand in ihrem Team, inspizieren eine Auswahl an Fotografien aus der Fotothek des Kunsthistorischen Instituts in Florenz.

» Seit dem Mittelalter etablierte sich eine Bildsprache für Normen, die das Volk „lesen“ konnte – ohne Worte, allein durch Anspielungen.

Frühe Neuzeit. Behrmann versteht Bilder, die mit einem rechtlichen Sinn verbunden sind, als „visuelle Konstitutionen“. Sie interessiert sich für ihre Verwendung im Lauf der Geschichte bis in die heutige Zeit – nicht zuletzt auch, um das allgemeine Bewusstsein für rechtliche Zusammenhänge zu schärfen. „Es gibt eine lange Tradition, Gesetze sowie Verbote durch Bilder zu erläutern“, sagt die Projektleiterin.

Über die Epochen und Kulturräume hinweg untersucht die Gruppe, wie moralische und normative Sinnzusammenhänge vermittelt wurden. Das reicht von klassischen Kunstwerken wie einer Darstellung des Jüngsten Gerichts an Orten der Rechtspflege bis zu unscheinbaren Zeichen im öffentlichen Raum. So geben Gravuren an mittelalterlichen Hauswänden oft Normmaße für Ziegel oder Waren wieder. Für Behrmann sind sie bildlich gesetztes Wirtschaftsrecht.

### DIE SICHTBARKEIT DER STRAFE WAR VON BEDEUTUNG

Bedeutsam sind auch die Orte des Rechts: Wie wurden Gerichtsgebäude oder Sitzungssäle gestaltet? „Juristische Motive in öffentlichen Gebäuden und Gerichtssälen sind bereits seit dem 13. Jahrhundert belegt“, sagt Behrmann. Beliebte waren biblische Motive. „Das Bild des ungläubigen Thomas, der mit dem Finger die Wunde Jesu berührt, war ein beliebtes Motiv in Zivilgerichten“, erklärt die Kunsthistorikerin und verweist auf die „Mercanzia“, den Gerichtsort der fünf größten Zünfte von Florenz. Die Botschaft an die Richter: Kommt der Wahrheit so nah als möglich! Biblische Könige dienten als leuchtendes Vorbild, so etwa König Salomon im Gerichtssaal des Palazzo Comunale in Lucignano, Arezzo.

An anderen Orten zieren Allegorien des gerechten oder des ungerechten Richters die Wände: In Sienas Palazzo Pubblico warnt Ambrogio Lorenzetti mit seinem Fresko aus dem Jahr 1338



Mahnung an die Richter: In Sienas Palazzo Pubblico stellte Ambrogio Lorenzetti 1338 die Tyrannei als thronenden Teufel dar, umgeben von den Lastern Geiz, Hochmut und Eitelkeit.

vor dem schlechten Richter und mit ihm vor der ungerechten Herrschaft: Es zeigt auf einer Wandseite die Tyrannei als thronenden Teufel umgeben von den Lastern Geiz, Hochmut und Eitelkeit. Auf der nächsten Wand thront die gute Regierungsführung mit den Tugenden Gerechtigkeit, Tapferkeit, Mäßigung und Klugheit. Frieden und Großherzigkeit gesellen sich dazu.

Ein weiterer Forschungsaspekt ist der Erkenntnisgewinn im Recht: Welche Beweisverfahren kamen zur Anwendung, die sich auf visuelle Argumentationen stützen? Behrmann streift mit ihrer Forschung den großen Bereich der Folter, der Martyrien christlicher Heiliger und nicht zuletzt auch der historischen Bedeutung der Sichtbarkeit der Strafe.

Verstöße gegen das Recht wurden öffentlich zur Schau gestellt. „Formen

der öffentlichen Erniedrigung, die eine Person in unvorteilhafter Pose, beschämender Kleidung, entstellender Maske, mit verzerren Gesichtszügen oder einem beleidigenden Text vor aller Augen in eine Schmähdfigur verwandeln, gehören zu den Schand- und Ehrenstrafen des vormodernen Strafrechts in Europa“, erklärt Behrmann.

Formen und Formate der Beschämungsrituale waren über die Epochen hinweg variantenreich: Noch immer erinnern Ringe und Ketten an Säulen und Hausfassaden belebter Plätze an einstige Pranger. Erniedrigen und abschrecken sollten auch die Schandmaske aus grobem Eisen oder der Schandmantel, ein aus Holzplatten gefertigter Mantel, den der Delinquent tragen musste.

Seit dem Mittelalter etablierte sich so eine Bildsprache, die das Publikum „lesen“ konnte – ohne Worte, allein durch



Die mexikanische Nationalheilige María de Guadalupe trägt wichtige aztekische Merkmale wie das Blau der früheren indigenen Herrscherschicht. Die erloschene Mondsichel zu ihren Füßen ist ein Symbol für den besiegten Schlangengott Quetzalcoatl.

Anspielungen und Allegorien. Sujet, Komposition und Anordnung sind im 16. und 17. Jahrhundert kein Zufall, sondern gewollt. „Wir verzeichnen in der Frühen Neuzeit eine Flut an Gesetzesbeschlüssen und neuen moraltheologischen Verhaltensvorschriften, die wieder verallgemeinert werden mussten“, sagt Behrmann. Und so wie in dieser Zeit eine Fülle an juristischen Epitomen oder Kompilationen großer juristischer Werke entstehen, findet sich auch in den barocken Kunstwerken eine enorme Anschaulichkeit – in Europa und in der Neuen Welt.

Getreu dem Prinzip *docere, delectare, movere* – belehren, erfreuen, bewegen – wurden auch die Kirchen und Verwaltungsgebäude der Neuen Welt gestaltet. Spanische Maler reisten in die Kolonien, um die kahlen Wände der sakralen und öffentlichen Neubauten auszustatten. Pracht und Opulenz zählten, schließlich galt es den reich geschmückten Tempeln und Stätten der Inka, Azteken und Maya etwas entgegenzusetzen. Bildhafte Überzeugungsarbeit leisteten detailreiche Darstellungen des Martyriums und opulente Mariendarstellungen, die bald schon einen eigenen Stil erhalten sollten.

Dabei gelang es, indigene Glaubensvorstellungen geschickt zu integrieren. Das zeigt sich besonders gut an den

Darstellungen der mexikanischen Nationalheiligen, der Jungfrau von Guadalupe. Dieses Gnadenbild Mariens wird nicht nur in Kirchen verehrt, sondern ist bis heute im Alltag der Mexikaner allgegenwärtig. Der Legende nach soll dem getauften Chichimeken Juan Diego im Dezember 1531 Maria erschienen sein mit der Bitte, eine Kirche zu errichten auf den Mauern eines einstigen Aztekentempels für die Muttergottes Tonantzin. Der Bischof glaubte ihm nicht. Erst als mitten im Winter Rosen blühten und er das Abbild Mariens auf Juan Diegos Mantel erkannte, ließ er die Kirche bauen und löste eine wahre Bekehrungswelle aus, die in Massen- und Zwangstaufern mündete. Wahre Begebenheit oder gelungene PR eines Bischofs, der die farbenprächtige und polytheistische Glaubenswelt der indigenen Bevölkerung mit Maria zu ersetzen suchte? Beides ist möglich.

Kunst- und Rechtshistoriker sind sich einig: Eine Mission allein durch das Schwert hätte nicht zu einer dauer-

haften Christianisierung geführt. „Der Kirche kam damals eine wichtige Vermittler- und Übersetzerrolle im transatlantischen *clash of civilizations* zu“, erklärt Rechtshistoriker Thomas Duve und fügt hinzu: „Spanische und indigene Eliten lebten nicht isoliert, sondern befanden sich im Austausch.“ Franziskaner und Jesuiten studierten die Bräuche, Traditionen und Rechtsvorstellungen der indigenen Völker. Und sie verstanden sich auf das, was Experten „kulturelle Translation“ nennen: indigene Glaubens- und Lebenskontexte in den katholischen Glauben zu integrieren, nicht nur zu erziehen und zu bilden, sondern auch den nötigen Freiraum für eine Uminterpretation zu lassen.

So haben heute kaum bekannte Geistliche und Künstler die Lebenswirklichkeit in der Neuen Welt mindestens im gleichen Maße geprägt wie die berühmten Eroberer. Ihre Handbücher sowie Kunstwerke zeugen noch heute davon. ◀

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Katholische Mönche und Priester haben wesentlich dazu beigetragen, die spanische Herrschaft in Süd- und Mittelamerika zu etablieren.**
- **Dabei nutzten die Kirchenleute eher einfache Handreichungen als offizielle Gesetzestexte.**
- **Das spanische Rechtssystem wurde zusammen mit dem christlichen Glauben vermittelt, wobei die Kirche geschickt indigene Traditionen umdeutete und integrierte.**
- **Auch mithilfe von Bildern wurden Gesetze und Verbote vermittelt – in der Neuen Welt ebenso wie in Europa, etwa mit biblischen Szenen oder symbolischen Darstellungen von Tugenden und Lastern.**

### GLOSSAR

**Allegorie:** Sinnbildliche Darstellung abstrakter Eigenschaften in menschlicher Gestalt, beispielsweise die Gerechtigkeit als Frau mit verbundenen Augen und mit Balkenwaage in der Hand.

**Epitome oder Breviarium:** Auszug oder vereinfachte Kurzfassung eines längeren Werks.

**Indigen:** In einem bestimmten Gebiet geboren oder beheimatet. Der Begriff wird verwendet zum Beispiel in Verbindung mit Völkern, Sprachen und Traditionen.

**Konquistadoren:** Die spanischen Eroberer in Mittel- und Südamerika im 16. und 17. Jahrhundert.

# Erweitern Sie Ihren Horizont. Und zwar ins Unendliche.

**STERNE UND WELTRAUM**  
Spektrum  
der Wissenschaft

2 | 2017  
sterne-und-weltraum.de

## Saturn

Impressionen  
aus dem Reich der Ringe

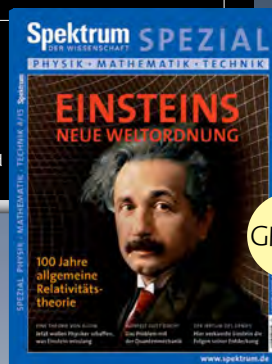


(D/AT/CH) 8,50 EUR / (CH) 14,80 CHF

 <p><b>GROSSTELESKOPE</b> Die Laser-Tricks der Astronomen</p>	 <p><b>KOSMISCHE STRAHLUNG</b> Der Beschleuniger im Zentrum der Milchstraße</p>	 <p><b>TWANNBERG</b> Ein Meteoriten-Streufeld im Schweizer Jura</p>
--	--	--

In **Sterne und Weltraum**  
erfahren Sie monatlich  
alles über Astronomie  
& Raumfahrt!

**Jetzt im Miniabo kennen  
lernen und Prämie sichern:**  
Drei aktuelle Ausgaben von  
**Sterne und Weltraum** für  
nur € 16,50 statt € 25,50 im  
Einzelkauf



**Jetzt bestellen:**

Telefon: 06221 9126-743

E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

[www.sterne-und-weltraum.de/aktion/mpf416](http://www.sterne-und-weltraum.de/aktion/mpf416)

# Der Feind im Huhn

Grippeviren sind extrem wandelbar – und damit in der Lage, ihren Wirt zu wechseln. Dass die Vogelgrippe daher auch für Menschen gefährlich werden kann, hatte **Werner Schäfer** am Tübinger **Max-Planck-Institut für Virusforschung** bereits Mitte der 1950er-Jahre geahnt. Jahrzehnte später sollte sich seine Vermutung bestätigen.

TEXT **ELKE MAIER**

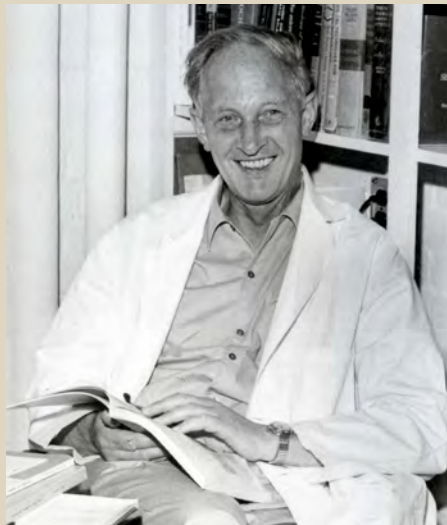
Das Sterben beginnt im Frühjahr 1997. Innerhalb weniger Tage verenden in drei Geflügelfarmen in Hongkong 7000 Hühner. Wenig später trifft es einen dreijährigen Jungen, der mit Grippe-symptomen in eine Klinik eingeliefert worden war. Ein Test offenbart: Todesursache ist in beiden Fällen derselbe Erreger – ein Vogelgrippevirus vom Typ H5N1. Als sich 18 weitere Personen infizieren, von denen sechs sterben, sind Experten alarmiert: Steht womöglich eine neue Grippepandemie bevor?

Der Vorfall beschwört Bilder aus den Jahren 1918/19 herauf, als die Spanische Grippe weltweit schätzungsweise 50 Millionen Menschen tötete. Um die Gefahr zu bannen, werden auf Hongkongs Geflügelmärkten und in den umliegenden Farmen mehr als 1,2 Millionen Hühner und Hunderttausende andere Vögel gekeult. Damit ist der Spuk vorbei. Die Besorgnis aber bleibt.

Der Ausbruch in Hongkong ist der erste dokumentierte Fall, bei dem ein Vogelgrippevirus Menschen nicht nur befällt, sondern auch tötet. Befürchtungen, dass dies eines Tages passieren könnte, kursierten allerdings schon länger. Der Virologe Werner Schäfer am Tübinger Max-Planck-Institut für Virusforschung hatte bereits in den 1950er-Jahren darüber spekuliert.

Werner Schäfer wurde am 9. März 1912 in Wanne geboren. Ursprünglich wollte er Architekt werden und machte nach dem Abitur eine Zimmermannslehre. Dann aber überlegte er es sich anders und studierte in Gießen Tiermedizin. Nach seiner Promotion ging er ans dortige Veterinärhygiene- und Tierseucheninstitut zu Erich Traub, einem Experten für Maul- und Klauenseuche.

Dann packte ihn die Abenteuerlust. Im Sommer 1939 – kurz nach seiner Heirat – machte er sich als Stipendiat des deutschen Forschungsrats auf den Weg nach Ostafrika. In Tansania richtete er sich im Gebäude eines deutschen Farmers ein einfaches Labor ein. Dort begann er, Tierseuchen wie Milz- und Rauschbrand, Brucellose und Pseudowut zu erforschen, welche die Viehbestände des Landes bedrohten.



Vogelgrippe als Forschungsfeld: Werner Schäfer widmete einen Großteil seiner wissenschaftlichen Laufbahn der klassischen Geflügelpest.

Eine Zukunft als Forscher in Afrika konnte sich Werner Schäfer gut vorstellen, aber der Krieg durchkreuzte seine Pläne. Schäfer wurde interniert und 1940 nach Deutschland überführt, wo man ihn als Veterinär-offizier zur Wehrmacht einzog. Zeitweise war er auf die Insel Riems bei Greifswald abkommandiert, um an der dortigen Reichsforschungsanstalt an einem Programm zur Impfstoffentwicklung gegen Influenza, Rinder- und Geflügelpest mitzuarbeiten.

Nach dem Krieg war eine Virologenstelle erst einmal nicht in Sicht. Kurzerhand eröffnete Werner Schäfer im hessischen Usseln eine Tierarztpraxis. Das Geschäft lief bestens, und er brauchte sich um das Auskommen seiner Familie nicht zu sorgen. Trotzdem zögerte er keinen Augenblick, als ihn im Frühjahr 1948 der Nobelpreisträger Adolf Butenandt kontaktierte, damals Direktor am Tübinger

Kaiser-Wilhelm-Institut für Biochemie. Er bot Schäfer eine Wissenschaftlerstelle an. Nach gut drei Jahren als Landtierarzt wechselte dieser mit 36 Jahren nach Tübingen und wurde Leiter der Abteilung „Animale Virologie“.

Zunächst war die Arbeitsgruppe in einem abbruchreifen Hinterhaus in der Pharmakologie untergebracht, der jährliche Sachetat betrug gerade einmal 10 000 Mark. Trotzdem war Werner Schäfer äußerst produktiv, hatte er doch in Afrika bestens gelernt zu improvisieren. Schon bald ging es mit seiner Karriere steil bergauf: 1954 wurde er zum Wissenschaftlichen Mitglied der Max-Planck-Gesellschaft ernannt, zwei Jahre später zum Direktor der Biologisch-Medizinischen Abteilung am neu geschaffenen Max-Planck-Institut für Virusforschung in Tübingen.

Eines von Schäfers Hauptforschungsgebieten war das Virus der klassischen Geflügelpest, heute gemeinhin bekannt als Vogelgrippe. Der hoch ansteckende Erreger befällt neben frei lebenden Vögeln auch alle Arten von Hausgeflügel. Eine Infektion führt zu Atemnot, Apathie, hohem Fieber und Störungen der Motorik. Betroffene Tiere sterben meist innerhalb weniger Tage.

Als Studienobjekt bot das gefürchtete Virus eine Reihe von Vorteilen: Zum einen hatte es sich als exzellentes Modell zum Studium der umhüllten Viren erwiesen, zum anderen durfte die amerikanische Konkurrenz aus seuchenpolizeilichen Gründen mit diesem Erreger nicht arbeiten. Im Labor ließ er sich gut handhaben und vermehrte sich prächtig in angebrüteten Hühnereiern. „Die Kollegen sind damals regelmäßig mit dem Dienstwagen, einem Opel P4 namens Friedolin, zur Hühnerfarm nach Tuttlingen gefahren, um von dort palettenweise Eier abzuholen“, erinnert sich Heinz Schwarz, der als Elektronenmikroskopiker am Institut eng mit Werner Schäfer zusammenarbeitete.

So lief die Virenzucht in Tübingen schon bald auf Hochtouren. Schäfers Ziel war es herauszufinden, wozu die unterschiedlichen Viruskomponenten gut sind und welche Rolle sie bei der Infektion spielen. Dazu kombinierte er elektronenmikroskopische Strukturanalysen mit physikalisch-chemischen und immunologischen Untersuchungen und beobachtete den Krankheitsverlauf im Tierversuch.

„Schäfer war ein echter Pionier, denn damals gab es ja noch keine DNA-Sequenzierung“, sagt Volker Moennig, Veterinärmedizin-Professor an der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover und früher am Tübinger Institut tätig. „Auch im Umgang mit dem Virus waren das noch andere Zeiten. Heute wäre ein Labor mit der Sicherheitsstufe 3 Pflicht.“

Trotz der begrenzten Möglichkeiten gelang es Schäfer, das Vogelgrippevirus umfassend zu charakterisieren. Dabei stieß er auf eine verblüffende Ähnlichkeit mit einem anderen Erreger – dem der

#### DIE WELT VOM 5. NOVEMBER 1991



Schäfer war es, der aus seinen Untersuchungen die – richtige – Vermutung ableitete, daß bestimmte Geflügelviren ein unerschöpfliches Reservoir für die Entstehung immer neuer Influenzavarianten sein könnten.

Influenza A, der Virusgrippe beim Menschen. Im Elektronenmikroskop erschienen beide mit feinen Stacheln bestückt, die Schäfer mit den „Zündern einer Seemine“ verglich. Auch physikalisch-chemisch und immunologisch hatten die Viren vieles gemein.

Schließlich waren beide Erreger in der Lage, Mäuse zu infizieren: Sie verursachten eine Lungenentzündung, die innerhalb weniger Tage tödlich verlief. Die pathologischen Veränderungen des Lungengewebes sahen bei beiden Formen identisch aus. Schäfer gelang es sogar, Mäuse mit dem Vogelgrippevirus gegen Influenza A zu immunisieren und umgekehrt.

Die frappierende Ähnlichkeit der beiden Erreger veranlasste Werner Schäfer zu einem beunruhigenden Schluss: „Man könnte sich vorstellen, daß die Vertreter dieser Gruppe gelegentlich ihre Wirtsspezifität ändern und daß so ein neuer Typ von Influenza-Erregern [...] entstehen kann“, schrieb er in einer grundlegenden Arbeit aus dem Jahr 1955. Er sollte recht behalten.

Heute weiß man, dass die Vogelviren tatsächlich einen natürlichen Genpool darstellen, aus dem neue Grippeerreger hervorgehen können. Diese sind potenziell in der Lage, auch Menschen



Seuchenherd: Der enge Kontakt zwischen Vögeln und Menschen begünstigt die Entstehung neuer Grippeerreger.

zu infizieren. Eine winzige Änderung an einem Proteinbaustein reicht dabei aus, damit das Virus die Immunabwehr umgehen und seinen Wirt wechseln kann. Am höchsten ist die Gefahr dort, wo Menschen und Hausgeflügel eng zusammenleben, so wie in vielen Ländern Asiens.

Experten fürchten dabei vor allem sogenannte Zwitterviren: Treffen in einer infizierten Zelle ein Vogel- und ein Menschenvirus aufeinander, kann durch den Austausch von Genstücken ein neuartiger Erreger entstehen, der sich von Mensch zu Mensch überträgt – die beste Voraussetzung, um auf Pandemiekurs zu gehen. Möglicherweise war auch die Spanische Grippe die Folge einer solch fatalen Liaison. Bei der Hongkong-Grippe von 1997 schafften die Viren zwar den Sprung vom Vogel auf den Menschen, nicht aber von Mensch zu Mensch.

Im Jahr 1956 präsentierte Werner Schäfer seine Ergebnisse zur Viren-Verwandtschaft auf einem Symposium in London. Im Publikum saßen Koryphäen wie James Watson und Francis Crick, die drei Jahre zuvor die DNA-Struktur entschlüsselt hatten. Die Teilnahme brachte Schäfer den internationalen Durchbruch. Es folgten Einladungen aus aller Welt, und die „Tübingen group“ gehörte schon bald zur ersten Riege der Virenforscher.

Ganze 16 Jahre widmete sich Werner Schäfer dem Vogelgrippevirus. Dank seiner Arbeit zählte der Erreger lange zu den am besten charakterisierten tierischen Viren überhaupt. Schäfer lieferte auch wichtige Grundlagen für die Impfstoffentwicklung als er entdeckte, dass eine bestimmte Komponente der Virushülle ausreicht, um beim Wirt eine Immunität hervorzurufen. Dies führte zur Entwicklung sogenannter Spaltvakzinen, die heute noch bei manchen Gripeschutzimpfungen oder etwa gegen Hepatitis B eingesetzt werden.

Anfang der 1960er-Jahre schloss Schäfer das Kapitel „Vogelgrippe“ schließlich ab. Stattdessen wechselte er – mit über 50 Jahren – zu einem ganz neuen Forschungsfeld: Er begann, Retroviren zu studieren, von denen man glaubte, dass sie eine Rolle bei der Krebsentstehung spielen. Tatsächlich fanden sich in deren Erbgut erstmals Onkogene, die ungebremstes Zellwachstum fördern. Schäfer und seine Kollegen untersuchten an Mäusen, welche Rolle die Viren bei der Leukämieentstehung spielen, und machten erfolgreiche Impfvorsuche.

In den 1980er-Jahren gelangten Retroviren in die Schlagzeilen, als bekannt wurde, dass sie die Immunschwächekrankheit Aids verursachen. Zu diesem Zeitpunkt war Schäfer bereits emeritiert. Der vielfach ausgezeichnete Wissenschaftler starb am 25. April 2000 in Tübingen, im Alter von 88 Jahren.



## Alle Gräser dieser Welt

Ingo Arndt, Jürgen Tautz, **GrasArt**

256 Seiten, Knesebeck Verlag, München 2016, 49,95 Euro

Wenn Ingo Arndt Gras fotografiert, geht er regelrecht auf die Pirsch. Dabei hat er eigentlich einige Vorteile, denn Gras kann nicht weglaufen, und es wächst fast überall. Aber der Naturfotograf jagt dem Gras und seinen Bewohnern regelrecht hinterher. Zwei Jahre war er auf Reisen und nimmt die Leser in seinem Fotobildband mit in die Pampa Patagoniens, in die Savannen Afrikas, die Steppe im Osten der Mongolei oder zum „Fluss aus Gras“ in den Everglades. Dort wartet er dann geduldig, um mit Präzision genau den Augenblick einzufangen, in dem die grünen Halme zu etwas ganz Besonderem werden.

Ingo Arndt zeigt dabei nicht nur die Schönheit der Gewächse wie Federgras, Büffelgras, Bambus, Schilf, Kammquecke oder Rohrkolben. Im Buch sieht der Leser auch – oft auf einer Doppelseite – fesselnde und ausdrucksstarke Aufnahmen der Tierarten, die von und auf dem Gras leben: etwa zwei Strauße, die mit mehr als 70 Kilometern pro Stunde ausgelassen über die afrikanische Savanne jagen; oder wie eine Löwin von den Jungtieren ihres Rudels bei der Rückkehr von der Jagd freudig und übermütig begrüßt wird.

Vereinzelt setzt Ingo Arndt ausgewählte Halme eines Graslands in Nahaufnahme vor weißem Hintergrund wie Kunstwerke in Szene. Sie werden dabei im Detail hervorgehoben und zeigen all ihre Schönheit und Farbigkeit, mit ihren gelben, orange- oder lilafarbenen Blüten sowie ihrem filigranen oder fächerartigen Aufbau.

Der Biologe und Verhaltensforscher Jürgen Tautz ergänzt die Naturaufnahmen mit fachlichen Informationen. Er leitet die Kapitel der Grasländer mit unterhaltsamen und lehrreichen Texten ein und erklärt, wie sich die Gräser über die unterschiedlichen Klimazonen ausgebreitet haben. Tautz lobt die Gräser als Fotosynthese-Überlebenskünstler, die vom Zwerggras bis zum 3,5 Meter hohen Bambus einiges leisten. Sie werden abgefressen, niedergetrampelt, abgemäht, überflutet, gepflegt oder ausgetrocknet. Aber verlorene Blätter wachsen schnell wieder nach, und die Vermehrung gelingt auch mit unterirdischen Abligern.

Gras kommt auch in trockenen und felsigen Gegenden und mit Wassermangel klar, wo Bäume und Büsche keine Chance hätten. Beim Sex ist Gras einerseits verschwenderisch, indem es ungeheure Mengen an Grasblütenpollen verstreut, um die Partner zu bestäuben. Aber es investiert keine große Mühe in große und auffällige Blüten. Dennoch schaffen die Graspflanzen wie kein anderes Ökosystem einen Lebensraum sowohl für Tiere mit eindrucksvoller Körpergröße wie Büffel als auch für Kleintiere in großem Artenreichtum.

Mit ihren unendlichen Weiten muten die Grasmeere der Steppe oder Prärie schier grenzenlos an. Gras, Gras, Gras, so weit das Auge schaut. Doch nur auf den ersten Blick. In der monotonen Ansicht verbergen sich die unterschiedlichsten Tierarten. Die massigen Körper der pflanzenfressenden Bisons, von denen es die letzten 30 Tiere wie-

der auf eine Population von einigen Hunderttausend gebracht haben, oder die Präriehunde, die in unterirdischen Bauten ein ausgeklügeltes Belüftungssystem geschaffen haben, finden sich hier. Sie leben im und mit dem Grasland wie auch die Prärieklapperschlange, die ihre Opfer mit einer Art eingebauter Wärmebildkamera im Dunkeln orten kann.

Das feuchte Grasland in den Everglades von Florida nannten die amerikanischen Ureinwohner „Pa-Hay-Okee“, Fluss aus Gras. Wasser ohne Ende, ein 60 Kilometer breites, nur wenige Zentimeter tiefes, gemächlich treibendes Gewässer ist fast vollständig von Gras und Tausenden anderen Pflanzen bedeckt. Hier gibt es Pelikane, die gut organisiert auf Beutezug gehen, und Greifvögel, die von Apfelschnecken leben. Große Teile des Flusses aus Gras wurden inzwischen trockengelegt für Zuckerrohrfelder.

Einige Grasländer musste Ingo Arndt lange suchen. So wurde die Patagonische Steppe durch Rinderzucht und Landwirtschaft fast vollständig vernichtet. Unberührte Pampa findet Arndt erst im rauen Klima an der Südspitze des Kontinents. Die Autoren äußern die Befürchtung, dass die Zerstörung der natürlichen Grasländer sich einmal ähnlich katastrophal auf das Leben auswirken könnte wie das Abholzen der Tropenwälder. Mit diesem Band schaffen sie es dank beeindruckender Fotos und unterhaltsamer fachlicher Texte, das Augenmerk auf die Gräser der Welt zu lenken.

Katja Engel





## Minutentod der Marmorkegelschnecke

Raoul Schrott, **Erste Erde Epos**

848 Seiten, Carl Hanser Verlag, München 2016, 68 Euro

Das Epos als literarische Gattung hat eine jahrtausendealte Geschichte. Definiert ist es als erzählende, weitschweifige und umfangreiche Dichtung, oft in Versform, immer handelnd von außergewöhnlichen Ereignissen und häufig mit mythologisch motivierten Protagonisten wie Göttern und Helden. Raoul Schrott macht sich einige Grundzüge des Genres zu eigen, stellt aber nicht Wesenheiten in den Mittelpunkt, sondern nichts weniger als die 13,8 Milliarden Jahre dauernde kosmische und biologische Evolution.

So gesehen, erzählt Schrott – Germanist, Anglist und Komparatist, Autor von Anthologien, Dramen und Essays – die längste denkbare Geschichte: die Geschichte der unbelebten und belebten Natur. Und doch ist das Buch so viel mehr. Es beleuchtet nicht nur Kosmologie, Biologie und Paläontologie, Kultur- und Ideengeschichte, sondern auch Ethik und Theologie. Es ist Poesie und nicht zuletzt Reisebericht. Auf alle Fälle aber ist es ein literarisches Experiment. Es verzahnt die genannten Sujets, setzt sie gelegentlich zu einem Bild zusammen, lässt sie bisweilen aber auch nebeneinander herdriften. Das macht die Lektüre ebenso beschwerlich wie die Kleinschreibung und der Verzicht auf Satzzeichen. Und das Schriftbild auf manchen Seiten erinnert an Elemente der konkreten Poesie.

Es gibt keinen roten Faden, an dem sich der Leser entlanghangeln könnte. Schrott erzählt weitgehend ohne feste Struktur im Sinne eines Jean Paul. Oder eines Laurence

Sterne, der in seinem Roman *Tristram Shandy* mit der Methodik der „Digression“ ständig vom Thema abweicht, Ideen vermengt, Gedankengänge verschachtelt, abbricht, neu aufnimmt und damit jede erzählerische Stringenz im Keim erstickt. Vielleicht ist es die Absicht des Autors, den Leser in die Rolle des modernen Forschers zu drängen, der angesichts der ungeheuerlich vielen wissenschaftlichen Fakten und Zusammenhänge leicht den Überblick verliert, selbst über sein eigenes Fachgebiet. Nicht von ungefähr ist der „Universalgelehrte“ längst Geschichte.

Bei Raoul Schrott wird die Sprache selbst zum Stilmittel, deren Sinnhaftigkeit sich nur jenem erschließt, der literarisch zu abstrahieren gewohnt ist, wie folgender Textauszug zeigen mag: „marmorkegelschnecken / ritzungen ihrer kaltnadel / in die haut . schmerzlose / lähmung der zungelider / und lungen . minutentod / durchsichtiger grabstichel“

Nicht weniger als 28 Kapitel und einen Anhang, aufgeteilt in acht Bücher, hat Schrott für sein Werk zusammengestellt. Da geht es – in deutlicher Anspielung an die Genesis – um das erste Licht, um Schöpfungsmythen, aber auch um die Theorie des Urknalls oder den Standort für das größte Teleskop der Welt. Es geht um die Geburt des Planetensystems, die vermutlich durch einen als Supernova explodierten Stern angetrieben wurde, um das Werden der Erde und um das erste Leben, dessen Zeugnisse Schrott in Form von Stromatolithen auf der Reise zu einer 3,5 Milliarden Jahre alten vulkani-

schen Lagune in Westaustralien sieht. Es geht um erste Pflanzen, die Landnahme des Lebens, um Primaten, um den Menschen.

Lediglich der mit knapp 160 Seiten recht ausführliche und an wissenschaftlichen Informationen reiche Anhang gleicht einem herkömmlichen Sachbuch. Hier herrschen ein mehr oder weniger nüchterner Duktus und ein konventionelles Schriftbild. Das Epos selbst aber ist niemals entpersonalisiert: Raoul Schrott schreibt von Menschen und ihren Erlebnissen – von Forschern natürlich, aber auch von einer Schriftstellerin, einem Fotografen, einer Frau, die vergewaltigt wird.

Als ob den in Landeck geborenen Autor seine Tour de Force selbst ermüdet hätte, kehrt er am Ende nach Tirol zurück: „ich habe das leidige thema der heimat jetzt abermals angeschnitten nur um von neuem zu merken dass mir das rechte gefühl dafür fehlt ich es mir erst auf den bergen erwandern ihre ganze gleichgültigkeit über mich ergehen lassen muss um wie sie zurückgestutzt zu werden auf das richtige mass (...)“

Damit spricht Schrott einen Kernpunkt seiner Darstellung an, denn das „Zurückstutzen auf das richtige Maß“ hätte dem Epos nicht geschadet, vertritt es doch eine extrem anthropozentrische Sicht. Aber der Mensch, um den sich alles dreht, ist keineswegs die Krone einer zielgerichteten Schöpfung. Evolution ist vielmehr erratisch, zufällig und kein abgeschlossener Prozess. Diese Erkenntnis versäumt das Buch zu vermitteln. Helmut Hornung



## Lust auf Licht

Tanja-Gabriele Schmidt, Mathias R. Schmidt, **Rettet die Nacht!** Die unterschätzte Kraft der Dunkelheit

256 Seiten, Riemann Verlag, München 2016, 21,99 Euro

Es heißt, LED-Lampen seien gut für die Umwelt – weil sie weniger Strom verbrauchen als andere, herkömmliche Leuchtmittel. Doch wenn es nach Tanja-Gabriele und Mathias R. Schmidt geht, dann stellen LED-Lampen gleichzeitig auch eine Gefahr für die Umwelt dar: Weniger Stromverbrauch bedeute geringere Kosten, und das wiederum könne dazu führen, dass wir alle mehr Lust auf Licht haben. Und so die Nacht immer mehr zum Tag machen.

In ihrem populären Sachbuch mit dem programmatischen Titel *Rettet die Nacht! Die unterschätzte Kraft der Dunkelheit* sorgen sich die beiden Publizisten um die Nacht als „gleichwertigen Partner des Tages“ – und das nicht nur konkret in Bezug auf LED-Lampen. Von der zunehmenden Erhellung des Nachthimmels geht in ihren Augen eine grundsätzliche und essenzielle Bedrohung für viele Lebewesen aus. Verursacht werde diese unter anderem durch die zunehmende Straßenbeleuchtung mit für Tiere schädlichen Lichtquellen.

Die Autoren betonen, dass es schwerwiegende Folgen habe, wenn auch die aller kleinsten nachtaktiven Insekten massenhaft an Straßenlaternen umkommen – denn so fehlen sie als Nahrungsquelle für größere Tiere. Auch die kunstvolle Beleuchtung öffentlicher Gebäude, etwa von Kirchen und Brücken, aber auch von Industrieanlagen oder Supermärkten, hat laut den Autoren ihren Anteil an der sogenannten Lichtverschmutzung. Leidtragende seien vor allem viele Zugvögel, welche die Orien-

tierung verlören, oder Fledermäuse, die durch künstliches Licht gestört würden und damit ihren Nachwuchs nicht mehr versorgen könnten.

„Was können wir tun, um Licht und Dunkel so auszubalancieren, dass es dem vielfältigen Miteinander sowohl moderner als auch uralter Lebenssysteme auf dieser Erde besser gerecht wird?“ Das Autorenpaar geht dabei von einem stark dualistisch ausgeformten „Spannungsfeld“ zwischen „den immer mehr raumgreifenden modernen, technisch-organisatorischen ‚Sachzwängen‘ und den seit Hunderttausenden von Jahren gültigen natürlich synchronisierten Gesetzmäßigkeiten der [...] biologisch rhythmisierten Prozesse“ aus.

Letztere gelte es allerdings nicht nur bei Tieren zu bewahren – auch der Mensch müsse vor zu viel künstlichem Licht und dessen gesellschaftlichen Auswirkungen geschützt werden. Denn wir gerieten immer stärker aus unserem natürlichen Gleichgewicht zwischen Aktivitäts- und dringend benötigter Ruhephase.

Die Autoren bestärken ihr Plädoyer für einen Schutz der „Natur der Nacht“ mit einem überraschenden und ziemlich genau hundert Seiten umfassenden Schlenker zu (religiöser) Mythologie, Literatur, Musik, darstellender Kunst und Film. Sie wollen damit deutlich machen, dass die Nacht eben auch ein „prägendes Motiv der Kulturgeschichte“ ist. Die Nacht ist dort „ein Ort des Glaubens und des Aberglaubens“, der

„in den großen Mythen und Schöpfungsgeschichten unterschiedlichster Religionen eine zentrale Rolle spielt“ und „ganz unterschiedlich konnotiert“ sei, „mal wild und sündhaft, mal segensreich und heilbringend“. Gerade auch für dieses reichhaltige kulturelle Motiv, fordern die Autoren, müsse die Nacht erhalten bleiben.

Die schnell und gut zu lesenden Kapitel sind mit Fakten unterfüttert, die weniger auf tiefgehender (naturwissenschaftlicher) Fachliteratur, sondern vor allem auf Medienartikeln oder Interviews mit Forschern und Aktivisten beruhen, die teilweise auch im Buch abgedruckt sind. So kommt es zu einigen Redundanzen und letzten Endes auch zu einer gewissen Oberflächlichkeit der Thematik.

Das liegt natürlich auch daran, dass ein Potpourri an Aspekten aus Biologie, Astronomie, Geschichte und Kulturwissenschaften präsentiert wird, die Nacht, Dunkelheit und (künstliches) Licht thematisieren. Dies macht andererseits aber auch den gewissen – eher unkonventionellen – Charme dieses Buchs aus.

*Rettet die Nacht!* eignet sich daher als unterhaltsames populärwissenschaftliches Einstiegswerk in das Thema Lichtverschmutzung – das dringend mehr Fürsprache und Beachtung braucht. Denn lassen wir die Nacht bei Bemühungen um Naturschutz weiterhin außen vor, „machen wir die in Taglandschaften erzielten Schutzerfolge teilweise wieder zunichte“.

Anne-Kathrin Weber



## Das Biest im Babystern

Heather Couper, Nigel Henbest, **Space**, Eine Entdeckungsgeschichte des Weltalls

296 Seiten, mairisch Verlag, Hamburg 2016, 18,90 Euro

Wer kennt sie nicht, die prächtigen Fotos glühender Gasbälle, beringter Planeten oder bizarrer Nebel? Die Astronomie ist eine „Augenwissenschaft“. Daher gilt das Credo: Wer die Öffentlichkeit erreichen will, der muss möglichst buntes Bildmaterial liefern. Heather Couper und Nigel Henbest legen ein astronomisches Sachbuch vor, das auf 296 Seiten keine einzige Abbildung enthält, kein Foto, keine Grafik, nichts. Geht das? Ja, das geht! Denn die Weltraumexperten der BBC entfalten ein eindrückliches Panorama der Astronomie, das von der ersten bis zur letzten Zeile zu fesseln vermag.

Gleich am Anfang des Buchs entzaubern Couper und Henbest so manchen Mythos, der sich über die Jahre hartnäckig gehalten hat: Galileo Galilei hat das Teleskop erfunden, Albert Einstein schwarze Löcher vorhergesagt – beides falsch. Und die Autoren weisen in ihrer Einleitung außerdem völlig zu Recht auf die vielen Frauen hin, die in der Wissenschaft Großartiges geleistet haben, aber weitgehend vergessen sind. Oder kennt jemand die 1979 gestorbene Britin Cecilia Payne-Gaposchkin. Sie fand immerhin heraus, dass das Universum hauptsächlich aus Wasserstoff besteht.

Der eigentliche Streifzug durch die 18 Kapitel lange Entdeckungsgeschichte des Weltalls beginnt mit einem der faszinierendsten Bauten der Urgeschichte: Stonehenge. Der Steinkreis, so erfährt man, diente wohl nicht zur Feier der Sommersonnenwende wie lange vermutet. Vielmehr war er dem Sonnenuntergang zu Beginn des Win-

ters gewidmet. Dass Couper und Henbest diese relativ neue Erkenntnis verbreiten, zeichnet das Buch aus. Darin geht es zwar vor allem um Historisches; aber dort, wo die aktuelle Astronomie ins Spiel kommt – etwa bei der Mission *Rosetta* zum Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko –, ist das Autorenpaar stets auf der Höhe der Zeit.

Das Buch ist halbwegs chronologisch aufgebaut, und so schließt sich die Geschichte des „Computers“ von Antikythera an, die im Jahr 1900 mit dem Fund eines metallenen Klumpens in einem Schiffswrack am Grund des Mittelmeers beginnt. Hinter diesem Mechanismus aus dem ersten Jahrhundert vor Christus steckt eine Art Planetarium, das recht exakt die Bewegungen im Sonnensystem zeigt und beweist, dass sich die Griechen keineswegs nur mit abstrakten Überlegungen zum Bau des Universums beschäftigt haben.

Apropos: Die Erfindung des Kalenders sowie das zähe Ringen um das richtige Weltbild – geozentrisch versus heliozentrisch – beschreiben Heather Couper und Nigel Henbest dann auf noch nicht einmal 50 Seiten. Trotz dieser komprimierten Darstellung kommt beim Lesen zu keinem Zeitpunkt das Gefühl auf, man versäume etwas Wesentliches.

Überhaupt besteht die Kunst des Autorenduos darin, komplexe Zusammenhänge präzise zu verdichten und gleichzeitig spannend, anschaulich und im besten Sinne journalistisch zu schreiben. „So ein Babystern ist ein ziemliches Biest. Aus seinen Polen

schießen üble Strahlen heißen Gases, die die dunklen Wolken, aus denen der Stern geboren wurde, zerstören“, heißt es etwa zum Thema Sterngeburt (Seite 140). Zur Auflockerung tragen viele Zitate bei, reportagenhafte Elemente und so manche Anekdote – etwa die, dass die Astronomen bei der Benennung von Asteroiden oft geheime Botschaften verschicken (Seite 235).

Ihrem angenehmen Stil bleiben die Autoren im gesamten Buch treu: So schildern sie die Entdeckung neuer Planeten oder die Degradierung Plutos zum „Zwerg“; sie berichten aus dem Leben der Sterne oder über schwarze Löcher; sie beschreiben den Anfang des Alls oder dessen dunkle Seiten; sie erzählen vom Einschlag gefährlicher Brocken aus dem Weltraum oder von der aktuellen Suche nach Leben auf dem Mars. Sie spekulieren schließlich über die Frage, ob wir allein sind – ein Thema, das vor allem wegen der derzeit mehr als 3500 bekannten Exoplaneten in Mode ist.

An dem Buch gibt es wenig zu bemängeln. Allenfalls die sehr britische Sicht der Dinge stößt auf. Und der eine oder andere Fehler, wenn etwa der Entdecker des Uranus, William Herschel, einen 2,13-Meter-Spiegel gehabt haben soll – eine Angabe, die sich nicht auf den Durchmesser, sondern auf die Brennweite beziehen muss (Seite 95). Was man angesichts der Fülle der gebotenen Informationen schmerzlich vermisst, ist ein Register. Was dagegen überhaupt nicht fehlt, sind Bilder. Und das spricht für die Autoren. Helmut Hornung



## Alles so schön smart hier!

Ulrich Eberl, **Smarte Maschinen**, Wie künstliche Intelligenz unser Leben verändert

408 Seiten, Carl Hanser Verlag, München 2016, 24 Euro

Werden wir bald mit Robotern, mit intelligenten Maschinen zusammenleben? Ja werden diese möglicherweise so sehr Teil von uns, dass uns ein „Transhumanismus“ droht, eine Überschreitung des Menschlichen hin zu einer neuen evolutionären Entwicklungsstufe? Ulrich Eberl jedenfalls erwartet eine unmittelbar bevorstehende „Revolution der smarten Maschinen“.

„Es gibt kein Forschungsgebiet, auf dem derzeit so viele revolutionäre Entwicklungen gleichzeitig stattfinden, wie das der Digitalisierung, der Robotik und der künstlichen Intelligenz“, schreibt Eberl in seinem jüngsten Buch mit dem Titel *Smarte Maschinen*. Tatsächlich wird das Thema schon seit Monaten durch alle Medien verbreitet, von Dossiers über Serien bis hin zu Themenwochen, ganz zu schweigen vom Internet: Überall begegnen wir Robotik und künstlicher Intelligenz.

Kein Wunder, dass Ulrich Eberl das Sujet gerade jetzt aufgreift. Er hat als freier Journalist Hunderte von Artikeln über Evolution, Nanotechnik, Weltraumforschung oder zu den Ausgrabungen in Troja veröffentlicht. Sein besonderes Interesse gilt der Zukunftsforschung – zwischen 2001 und 2015 war er Chefredakteur und Herausgeber von *PICTURES OF THE FUTURE*, der Unternehmenszeitschrift von Siemens.

Der Autor stellt jedem der 13 Kapitel seines Buchs eine Fortsetzungsgeschichte in Form eines in der Zukunft angesiedelten Thrillers oder einer Kriminalgeschichte voran: Storytelling gilt ja als Zauberwort der

jüngeren Schreibkunst. In aller Kürze: Ein Forscher erwacht nach 30 Jahren Koma im Jahr 2050 und ist umgeben von Robotern und neuer – auch medizinisch enorm nützlicher – Technologie, die jedoch in Zukunft nicht vor Missbrauch und menschlicher Bosheit schützen kann. Eberls Trick: Der Leser kann sich emotional mit einer Figur identifizieren, die das Thema *smart machines* unmittelbar erlebt.

Ambivalenzen gehören zur Sprache, auch wenn wir sie nicht bemerken oder wahrhaben wollen. Ulrich Eberl orientiert sich an der selbstverständlich gewordenen Bezeichnung „Smart-phone“, wenn er von den „smarten Maschinen“ spricht. Dennoch bleibt der englisch-deutsche Neologismus eine merkwürdige Konstruktion. Interessant ist, sich die Etymologie des Wortes „smart“ einmal näher anzusehen: Der Ursprung im Altenglischen, Germanischen und letztlich Indogermanischen hat immer mit Stechen und Schmerzen zu tun. Ja, das deutsche Wort „Schmerzen“ und das englische *smart* besitzen dieselbe historische Wurzel. Freilich gehen die Wortbedeutungen im heutigen Sprachgebrauch weiter auseinander, doch im Witzigen – einer weit verbreiteten Bedeutung von „smart“ – schwingt noch etwas von dem ursprünglich Stechenden mit.

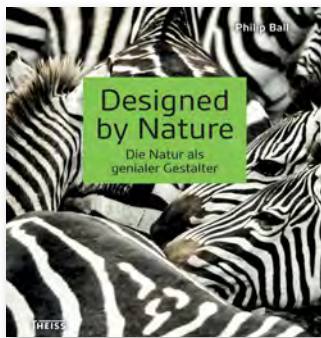
Ulrich Eberl bietet in seinem Buch über weite Strecken viele kleine Informationsschnipsel und damit eher internetgerechte Kleinformate über die gegenwärtigen Entwicklungen der künstlichen Intelligenz und

Robotik weltweit. Eine durchkomponierte Reflexion über die bevorstehenden möglichen Entwicklungen wird man dagegen vermissen. Aber dadurch wird einem klar, an wie vielen unterschiedlichen Orten und mit wie vielen verschiedenen Ansätzen in diesem Bereich gearbeitet wird: Roboter, die schon heute an Hotelrezeptionen hantieren, Finanzberatung betreiben und Krebsdiagnosen stellen; Drohnen, die genau berechnen, welche Felder wann gedüngt werden müssen.

Oft überschlägt der Autor sich förmlich mit seinem Optimismus, den er mit den Chancen verbindet, die sich für uns alle in Zukunft mit den hilfreichen Robotern auf-tun. Interessant – und gut geschrieben – ist das Buch aber eigentlich erst dort, wo es um die Risiken für die Gesellschaft und für die Menschheit insgesamt geht: Roboter, die menschliche Arbeiter und Denker ersetzen werden.

Eberl beschäftigt sich unter anderem mit den sehr fundierten Warnungen des englischen Mathematikers und Philosophen Nick Bostrom, der wie andere bekannte Wissenschaftler davor warnt, dass eine „Superintelligenz“ schließlich die Menschheit abschaffen könnte. Dennoch bleibt der Autor bei seiner positiven Einstellung, wenn er am Ende meint, dass auch in Zukunft der Mensch im Zentrum aller Entwicklungen stehen werde und eher die Chance bestehe, dass wir durch die smarten Maschinen über uns selbst nachdenken und uns neu definieren können.

Peter M. Steiner



## Die Anmut des Blumenkohls

Philip Ball, **Designed by Nature**, Die Natur als genialer Gestalter

288 Seiten, Theiss Verlag, Darmstadt 2016, 39,95 Euro

Ob das Fleckenfell eines Leoparden, die Spiralform einer Schnecke oder die filigranen Sechsecke von Schneeflocken – in der belebten und unbelebten Natur finden sich zahllose, scheinbar perfekt gestaltete Formen und Muster. Dabei stößt man in verschiedenen Dimensionen auf ähnliche Designs. Die Spirale etwa ist nicht nur bei Weichtieren beliebt, sondern formt auch junge Farnwedel und lässt sich als Spiralgalaxie am Nachthimmel beobachten. Menschen lassen sich davon schon seit Jahrtausenden inspirieren: Sie schmücken steinzeitliche Kultstätten mit Spiralmustern, Kirchen mit gedrehten Säulen und kreieren Handtaschen im Leo-Look.

Aber wie kommen all die Muster eigentlich zustande? Und wozu dienen sie? Im vorliegenden Buch geht der in London lebende Wissenschaftsautor Philip Ball diesen Fragen auf den Grund. Ball ist Chemiker und promovierter Physiker und schreibt für renommierte Zeitungen und Magazine wie die *NEW YORK TIMES* oder *THE GUARDIAN*. Daneben hat er schon mehrere Sachbücher veröffentlicht. In *Designed by Nature* beleuchtet er die mathematischen, chemischen und physikalischen Gesetze, die hinter den Gestaltungsprinzipien in der Natur stehen.

Das Werk ist faktenreiches Sachbuch und opulenter Bildband zugleich: Auf 288 Seiten finden sich neben informativen Texten auch mehr als 300 farbenfrohe, oft formatfüllende Fotos. Die neun Kapitel widmen sich jeweils einem bestimmten Mus-

ter- oder Formenkreis. Denn so unermesslich die Vielfalt auf den ersten Blick scheinen mag – bei näherer Betrachtung lassen sich viele Designs einer begrenzten Zahl von Kategorien zuordnen: Spiralen, Fraktale, Wellen oder Sechsecke.

Dabei sind oft ganz unterschiedliche Gestaltungsprinzipien am Werk. Bienen etwa gehen beim Bau ihrer sechseckigen Waben ganz pragmatisch vor: Sie wählen diejenige Form, welche die Fläche optimal ausfüllt und dabei mit dem wenigsten Material auskommt. Die Sechsecke von Schneeflocken ergeben sich dagegen aus der Kristallstruktur von Eis. Darin sind die Wassermoleküle in hexagonalen Ringen erstarrt, was die Wachstumsrichtung der Arme lenkt. Dass trotzdem keine Flocke der anderen gleicht, liegt daran, dass das System schon auf minimale Veränderungen von Lufttemperatur und -feuchtigkeit reagiert. „Es scheint, als wolle uns die Natur mit endlosen Variationen an Schneeflocken von ihrer Kreativität überzeugen“, schreibt Ball.

Wer die Augen offen hält, stößt auf ein Paradebeispiel für Musterbildung sogar beim Kochen: Der Romanesco, eine Blumenkohlvariante, bildet sowohl Spiralen als auch Fraktale aus, und das auf gleich mehreren Hierarchieebenen. Und damit nicht genug: In dem dekorativen Gemüse stecken auch noch die berühmten Fibonacci-Zahlen. Der italienische Mathematiker Leonardo von Pisa (bekannt als Fibonacci) hatte die Zahlenreihe im Jahr 1202 aufgeschrieben. Der Clou: Je größer die Zahlen werden, des-

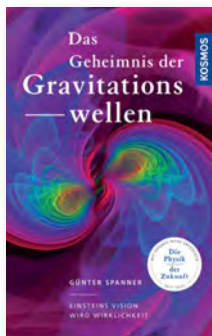
to mehr nähert sich das Verhältnis zweier Nachbarzahlen dem Wert 1,618 – was dem Goldenen Schnitt entspricht.

Balls Buch liefert eine Fülle von Information, besticht aber vor allem durch seine Aufmachung. Die Fotos fangen die Schönheit der Muster und Formen ein und sind ein ästhetischer Genuss. Die Texte sind allgemein verständlich gehalten und verzichten weitgehend auf mathematische Details. Die Bildunterschriften sind mitunter ausbaufähig, Artnamen fehlen häufig. Dass eine – seltsamerweise fühllose – Streifenwanze als Käfer bezeichnet wird (Seite 30) und eine Meeresschnecke als Muschel (Seite 92), mag der Übersetzung geschuldet sein.

„Ist die Natur schöner als nötig?“, fragt der Autor gegen Ende des Buchs. Denn tatsächlich ist es nur schwer zu erklären, wie etwa die prächtigen Regenbogenstreifen auf den Blättern der Dreimasterblume zustande kommen. Die Streifen beim Baumpilz sind dagegen einfach das Ergebnis periodischen Wachstums so wie auch die Jahresringe von Bäumen.

Ein Gesetz der Musterbildung gibt es nicht, so Philip Balls Fazit. Vielmehr „sehen einige Dinge in der Natur so aus, wie sie aussehen, einfach weil sie so geworden sind“, wie der schottische Biologe und Mathematiker D’Arcy W. Thompson vor 100 Jahren bemerkte. Form ist nichts Statisches. Sie entsteht durch Wachstum. Wer das so hinnehmen kann, der darf in dem Buch auch einfach nur blättern und staunen.

Elke Maier



## Im Dunkel des Universums

Günter Spanner, **Das Geheimnis der Gravitationswellen**, Einsteins Vision wird Wirklichkeit

288 Seiten, Kosmos Verlag, Stuttgart 2016, 19,99 Euro

Montag, 14. September 2015. Es ist ziemlich genau 11.51 Uhr, als Marco Drago am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover das Signal als Erster sieht. Für etwa eine Viertelsekunde ist eine 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 absichtlich eingestreutes Signal, 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. Beide 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. Die Entdeckung von Gravitationswellen ist eine Sensation, Medien rund um den Globus berichten von dem Fund, der am 11. Februar 2016 verkündet wird.

Ein Dreivierteljahr später legt Günter Spanner eine konzise Zusammenfassung

des Themas vor. Der Physiker war an der Entwicklung der Laserdetektoren, welche die Wellen letztlich nachgewiesen haben, selbst beteiligt. Diese Tatsache ist Fluch und Segen zugleich: Als Insider weiß Spanner genau, wovon er schreibt, die Darstellung ist fachlich stets korrekt. Aber als Insider setzt Spanner auch ein Vorwissen voraus, das den Laienleser hie und da überfordert. Kurz: Das Niveau des Buchs ist fast durchgängig zu hoch, etwa der Abschnitt über Quadrupolstrahlung. „Gravitationswellen entstehen, wenn eine Massenverteilung ein zeitlich verändertes Multipolmoment von mindestens Quadrupolcharakter besitzt“, heißt es da beispielsweise zur Erklärung. Harte Kost.

In acht Kapiteln bietet das Buch alles, was man über das Thema wissen muss. Am Anfang steht folgerichtig eine Zusammenfassung der allgemeinen Relativitätstheorie, die durch die Entdeckung 100 Jahre später mit Bravour ihren letzten Test bestanden hat – obwohl Albert Einstein die Gravitationswellen 1916 zwar vorhersagte, zwei Jahrzehnte später daran aber zweifelte. Spanner berichtet aus der Geschichte der Forschung, über die massiven Aluminiumzylinder von Joseph Weber und die ers-

ten Laser-Interferometer, die auch in der Anlage Advanced LIGO stecken.

Der Leser erfährt dann vieles über Simulationen in Supercomputern, die Voraussetzung sind für das Aufspüren und Einordnen von Signalen aus den Weiten des Weltraums. Ausführlich schildert der Autor, was es mit der Entdeckung im September 2015 auf sich hatte – die Verschmelzung zweier schwarzer Löcher mit 29 und 36 Sonnenmassen in 1,3 Milliarden Lichtjahren Entfernung. Spanner wirft zudem einen Blick auf die bestehenden und künftigen Detektoren, bevor er am Schluss die Folgen für die Kosmologie schildert. Denn die Messungen stoßen ein neues Beobachtungsfenster auf, liegen doch nahezu 99 Prozent des Universums 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. Fazit: Das Buch ist eine erschöpfende Darstellung der Gravitationswellen-Astronomie. Wer Vorkenntnisse mitbringt und sich auf den Text einlässt, wird es mit Gewinn lesen. Helmut Hornung

### Weitere Empfehlungen

- Gerd Ganteför, **Heute Science Fiction, morgen Realität?** An den Grenzen des Wissens und darüber hinaus, 234 Seiten, Verlag Wiley-VCH, Weinheim 2016, 24,90 Euro
- Tilman Steiner, **Die Anschauung der Welt**, Die Vernunft der Schönheit und die Unvernunft der Rationalität, 488 Seiten, Europa Verlag, Berlin 2016, 24,90 Euro

# Standorte

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

## Niederlande

- Nimwegen

## Italien

- Rom
- Florenz

## USA

- Jupiter, Florida

## Brasilien

- Manaus

## Luxemburg

- Luxemburg



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

## Impressum

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

### Redaktionsanschrift

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

### Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

### Redaktionsleitung

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

### Redaktion

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

### Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)

### Gestaltung

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

### Litho

KSA Media GmbH  
Zeuggasse 7  
86150 Augsburg

### Druck & Vertrieb

Vogel Druck- & Medienservice GmbH  
Leibnizstraße 5  
97204 Höchberg

### Anzeigenleitung

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

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

Die **Max-Planck-Gesellschaft** zur Förderung der Wissenschaften unterhält 83 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 22 200 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6 000 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.

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



# Forschung leicht gemacht.

**Schafft die Papierstapel ab!**

Das Magazin der Max-Planck-Gesellschaft  
als ePaper: [www.mpg.de/mpf-mobil](http://www.mpg.de/mpf-mobil)

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

Kostenlos  
downloaden!



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT